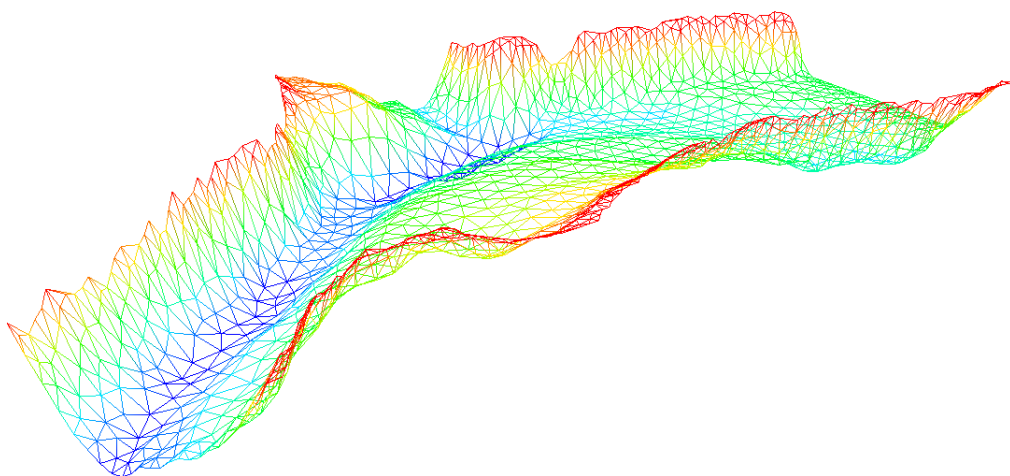




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»



**ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΙΧΘΥΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΠΟΤΑΜΩΝ ΜΕ
ΔΙΟΔΟΥΣ ΙΧΘΥΩΝ**

Ευγενία Οικονομοπούλου

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»

Επιβλέπων: Α. Ι. Στάμου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	11
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	12
ABSTRACT	13
Extended Abstract.....	14
Introduction.....	14
Parts and methodology of the present work.....	15
Methodology.....	15
Basic principles of the fish model.....	15
Calculation steps.....	16
Case study area.....	18
Measurements of fish trajectories.....	18
Habitat Suitability Indexes for Atlantic Salmon smolts.....	21
Sensitivity analysis.....	23
Implementation of the fish model.....	25
Conclusions.....	25
Future work.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	26
Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....	27
Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΙΧΘΥΩΝ	28
2.1. Γενικά.....	28
2.2. Μεταναστευτικά είδη ιχθύων.....	28
2.3. Μέθοδοι ανίχνευσης των ιχθύων.....	29
2.3.1 Αισθητήρια όργανα ανίχνευσης.....	29
2.3.2 Το πλευρικό σύστημα (lateral line system).....	29
2.3.3. Η περιοχή αντίληψης (sensory onoid).....	30
2.4. Κίνηση, συμπεριφορά και ταχύτητα ιχθύων.....	31
2.4.1. Κίνηση ιχθύων.....	31
2.4.2. Ταχύτητα ιχθύων.....	32
2.4.3. Συμπεριφορά ιχθύων.....	32
2.5. Παρουσίαση υφιστάμενων μοντέλων συμπεριφοράς ιχθύων.....	34
2.5.1. Haefner and Bowen, 2002; Lemasson et al., 2008.....	34
2.5.2. Abdelaziz S., 2013.....	36
2.5.3. Goodwin et al., 2006, 2014.....	38
2.5.4. Arenas et al., 2015.....	40

2.5.5. Gao et al., 2016.....	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	43
3.1. Γενικά.....	43
3.2. Βασικές εξισώσεις του μοντέλου.....	43
3.2.1. Τυρβώδης ροή.....	44
3.3. Περιοχή Μελέτης	45
3.3.1 Περιοχή εφαρμογής – Jedsted Mill Fish Farm	45
3.3.2 Δεδομένα βαθυμετρίας και ταχύτητας, παροχές και τραχύτητα πυθμένα ποταμού	47
3.4. Εφαρμογή και βαθμονόμηση του υδροδυναμικού μοντέλου στην περιοχή μελέτης	52
3.4.1 Διαμόρφωση υπολογιστικού πλέγματος και γεωμετρίας	52
3.4.2 Οριακές συνθήκες	54
3.4.3 Εφαρμογή του υδροδυναμικού μοντέλου	54
3.4.4. Ανεξαρτησία πλέγματος.....	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΙΧΘΥΩΝ.....	62
4.1. Μετατροπή υπολογιστικού μη δομημένου πλέγματος σε δομημένο πλέγμα.....	62
4.2. Παρουσίαση μοντέλου ιχθύος	65
4.3. Διάγραμμα ροής μοντέλου ιχθύος.....	70
4.4. Επεξεργασία πειραματικών τροχιών ιχθύων στο πεδίο	72
4.5. Δείκτες καταλληλότητας ενδιαιτήματος ιχθύος	76
4.5.1. Καμπύλες καταλληλότητας Ατλαντικού Σολομού από βιβλιογραφία.....	76
4.5.2. Καμπύλες καταλληλότητας Ατλαντικού Σολομού με βάση την περιοχή μελέτης	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	84
5.1. Αποτελέσματα εφαρμογής υδροδυναμικού μοντέλου	84
5.1.1. Τυρβώδης κινητική ενέργεια και συσχέτιση με τις πειραματικές τροχιές των ιχθύων	85
5.2. Αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων.....	89
5.2.1. Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων.....	89
5.2.2. Εφαρμογή του μοντέλου ιχθύος για προσομοίωση των πειραματικών τροχιών	109
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	119
6.1. Συμπεράσματα	119
6.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	120
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	121

Η εικόνα στο εξώφυλλο απεικονίζει τον πυθμένα του ποταμού της περιοχής μελέτης σε τρισδιάστατο υπολογιστικό πλέγμα.

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 2.2-1: Ατλαντικός Σολομός (<i>Salmo salar</i>) [πηγή: NOAA Fisheries-National Oceanic and Atmospheric Administration, https://www.fisheries.noaa.gov/species/atlantic-salmon-protected].....	29
Εικόνα 2.3-1: Το πλευρικό σύστημα [πηγή: www.sciencesource.com].....	30
Εικόνα 2.3-2: Δισδιάστατη άποψη επιμηκών και κατακόρυφων αποστάσεων της προσομοιωμένης περιοχής αντίληψης του ιχθύος [πηγή: Goodwin et al., 2006].....	31
Εικόνα 2.5-1: (α) Συμπεριφορές ιχθύων κοντά στις περσίδες, (b) προσομοιωμένες τροχιές ιχθύων και πεδίο ροής κοντά στις περσίδες [πηγή: Haefner and Bowen, 2002]	35
Εικόνα 2.5-2: Προσομοιωμένες τροχιές ιχθύων για διαφορετικές αρχικές θέσεις διατομών (0.3, 1.4, 2.2μ). Η ευθεία διαγώνια γραμμή είναι οι περσίδες [πηγή: Haefner and Bowen, 2002]	36
Εικόνα 2.5-3: Προσομοιωμένη και πειραματική κίνηση ιχθύος μέσα στη δίοδο. Με την διακεκομμένη γραμμή είναι η προσομοιωμένη και με την συνεχόμενη πορτοκαλί είναι η πειραματική κίνηση-περίπτωση 1 [πηγή: Abdelaziz et al. 2013].....	37
Εικόνα 2.5-4: Προσομοιωμένη και πειραματική κίνηση ιχθύος μέσα στη δίοδο. Με την διακεκομμένη γραμμή είναι η προσομοιωμένη και με την συνεχόμενη πορτοκαλί είναι η πειραματική κίνηση-περίπτωση 2 [πηγή: Abdelaziz et al. 2013].....	37
Εικόνα 2.5-5: Προσομοιωμένη και πειραματική κίνηση ιχθύος μέσα στη δίοδο. Με την διακεκομμένη γραμμή είναι η προσομοιωμένη και με την συνεχόμενη πορτοκαλί είναι η πειραματική κίνηση-περίπτωση 3 [πηγή: Abdelaziz et al. 2013].....	37
Εικόνα 2.5-6: Χαρακτηριστικά πεδίου ροής και τροχιές ιχθύων. (A) Ισομεγέθεις γραμμές του πεδίου επιταχύνσεων στην περιοχή προσομοίωσης, (B) μέγεθος ταχύτητας ροής, (C) τροχιά πραγματικού ιχθύ, (D) τροχιά προσομοιωμένου ιχθύ [πηγή: Goodwin et al., 2014].	39
Εικόνα 2.5-7: Κατανομές πιθανοτήτων ώθησης των ιχθύων F_t (πρώτη γραμμή), γωνίας α (δεύτερη γραμμή) και θT (τρίτη γραμμή) για τρία είδη ιχθύων: (α) Σολομός Chinook, (b) Σολομός Sockeye και (c) Σολομός Steelhead [πηγή: Arenas et al., 2015].....	40
Εικόνα 2.5-8: Γωνίες που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της συμπεριφοράς ιχθύος. Δύναμη ώθησης F_t και ταχύτητα ροής u_f [πηγή: Arenas et al., 2015].	42
Εικόνα 3.3-1: Περιοχή Jedsted Mill Fish Farm, Δανία [πηγή: Google Earth]	45
Εικόνα 3.3-2: Επικρατούσα βλάστηση στην περιοχή (<i>Sparganium erectum</i>) [πηγή: Wikipedia.org].....	46
Εικόνα 3.3-3: Διακύμανση βάθους από τις μετρήσεις στο πεδίο [πηγή: Svendsen et al., 2010]. Οι διατομές στις εισόδους και εξόδους φαίνονται με λευκές γραμμές.	47
Εικόνα 3.3-4: Διακύμανση μέσης ταχύτητας από τις μετρήσεις στο πεδίο γραμμές [πηγή: Svendsen et al., 2010]. Οι διατομές στις εισόδους και εξόδους φαίνονται με λευκές γραμμές.	47
Εικόνα 3.3-5: Οι όχθες του ποταμού της περιοχής μελέτης σε σύστημα συντεταγμένων UTM και στη ζώνη 32N, [ArcMap].	48

Εικόνα 3.3-6: Βαθυμετρία και μέση ταχύτητα στην διατομή εισόδου στα ανάντη της περιοχής μελέτης.	49
Εικόνα 3.3-7: Βαθυμετρία και μέση ταχύτητα στη διατομή στην είσοδο του fish farm στην περιοχή μελέτης.	49
Εικόνα 3.3-8: Βαθυμετρία και μέση ταχύτητα στη διατομή εξόδου στα κατάντη της περιοχής μελέτης.	49
Εικόνα 3.4-1: Το μη δομημένο υπολογιστικό πλέγμα με απόσταση κόμβων 1.5m.	52
Εικόνα 3.4-2: Τρισδιάστατη διακύμανση βαθυμετρίας. Τα σημεία χρησιμοποιήθηκαν για την χωρική παρεμβολή στους κόμβους του πλέγματος. Τα βάθη κυμαίνονται από 0.30m έως 2.05m.....	53
Εικόνα 3.4-3: Τρισδιάστατη απεικόνιση του πυθμένα μετά την παρεμβολή της βαθυμετρίας στο πλέγμα. Τα βάθη κυμαίνονται από 0.30m έως 2.05m.	53
Εικόνα 3.4-4: Τελική επιλογή και κατανομή συντελεστών Manning στο πεδίο και οι χαρακτηριστικές διατομές που επιλέγονται για τον έλεγχο των προφίλ ταχυτήτων με τις διακεκομμένες γραμμές.	55
Εικόνα 3.4-5: Προφίλ ταχυτήτων πειραματικών μετρήσεων και προσομοίωσης στη διατομή εισόδου στα ανάντη της περιοχής μελέτης.	56
Εικόνα 3.4-6: Προφίλ ταχυτήτων πειραματικών μετρήσεων και προσομοίωσης στη διατομή εισόδου του fish farm της περιοχής μελέτης.	57
Εικόνα 3.4-7: Προφίλ ταχυτήτων πειραματικών μετρήσεων και προσομοίωσης στη διατομή εξόδου στα κατάντη της περιοχής μελέτης.	57
Εικόνα 3.4-8: Μη δομημένο πλέγμα με απόσταση κόμβων 1.5m	59
Εικόνα 3.4-9: Μη δομημένο πλέγμα με απόσταση κόμβων 1.0m	59
Εικόνα 3.4-10: Μη δομημένο πλέγμα με απόσταση κόμβων 0.8m.....	59
Εικόνα 3.4-11: Προφίλ ταχυτήτων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις με διαφορετικά πλέγματα στη διατομή εισόδου στα ανάντη της περιοχής μελέτης.....	60
Εικόνα 3.4-12: Προφίλ ταχυτήτων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις με διαφορετικά πλέγματα στη διατομή εισόδου του fish farm της περιοχής μελέτης.	60
Εικόνα 3.4-13: Προφίλ ταχυτήτων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις με διαφορετικά πλέγματα στη διατομή εξόδου στα κατάντη της περιοχής μελέτης.	61
Εικόνα 4.1-1: Κατανομή εύρους τιμών ταχυτήτων πεδίου ροής και βάθους νερού μετά την παρεμβολή τους στους κόμβους του δομημένου πλέγματος αντίστοιχα.	62
Εικόνα 4.1-2: Προφίλ ταχυτήτων μεταξύ δομημένου και μη δομημένου πλέγματος στη διατομή εισόδου ανάντη της περιοχής μελέτης.	63
Εικόνα 4.1-3: Προφίλ ταχυτήτων μεταξύ δομημένου και μη δομημένου πλέγματος στη διατομή εισόδου στο fish farm της περιοχής μελέτης.	64
Εικόνα 4.1-4: Προφίλ ταχυτήτων μεταξύ δομημένου και μη δομημένου πλέγματος στη διατομή εξόδου κατάντη της περιοχής μελέτης.	64
Εικόνα 4.2-1: Περιοχή αντίληψης ιχθύος (sensory onoid).	66

Εικόνα 4.4-1: Απεικόνιση υδροφώνων στο ποτάμι. Τα υδρόφωνα φαίνονται με τις κόκκινες κουκίδες.....	72
Εικόνα 4.4-2: Αριστερά είναι το τραπέζιο των υδροφώνων στις άγνωστες συντεταγμένες και μία πειραματική τροχιά ιχθύος ανίστοιχα και δεξιά το τραπέζιο και η τροχιά μετά τον αφινικό μετασχηματισμό.....	74
Εικόνα 4.4-3: Πειραματικές τροχιές ιχθύων όπως προκύπτουν μετά τον μετασχηματισμό των συντεταγμένων τους. Η κουκκίδα συμβολίζει την θέση εκκίνησης και το βέλος την τελευταία θέση του ιχθύος.	75
Εικόνα 4.5-1: Διάγραμμα δείκτη καταλληλότητας υποστρώματος για μικρό και ενήλικο Σολομό.....	77
Εικόνα 4.5-2: Καμπύλες καταλληλότητας βάθους νερού για μικρό και ενήλικο Σολομό.	77
Εικόνα 4.5-3: Καμπύλες καταλληλότητας ταχύτητας νερού για μικρό και ενήλικο Σολομό. ...	78
Εικόνα 4.5-4: Η κατανομή του δείκτη καταλληλότητας στην περιοχή μελέτης για τον ενήλικο Σολομό (adult).....	78
Εικόνα 4.5-5: Η κατανομή του δείκτη καταλληλότητας στην περιοχή μελέτης για τον μικρό Σολομό (parr).	79
Εικόνα 4.5-6: Διακύμανση των τιμών του μετρητή k. Υψηλότερες τιμές υποδεικνύουν περισσότερες επισκέψεις στα σημεία αυτά από τους μελετώμενους ιχθύες.....	80
Εικόνα 4.5-7: Καμπύλη καταλληλότητας βάθους νερού για τον νεαρό (smolt) Ατλαντικό Σολομό.....	81
Εικόνα 4.5-8: Καμπύλη καταλληλότητας ταχύτητας νερού για τον νεαρό (smolt) Ατλαντικό Σολομό.....	81
Εικόνα 4.5-9: Καταλληλότητα υποστρώματος πυθμένα για το νεαρό (smolt) Ατλαντικό Σολομό.....	82
Εικόνα 4.5-10: Κατανομή δείκτη καταλληλότητας στην περιοχή μελέτης για τον νεαρό Σολομό (smolt).	82
Εικόνα 5.1-1: Ισοδυναμικές καμπύλες της διακύμανσης του βάθους νερού στο πεδίο.	84
Εικόνα 5.1-2: Ισοδυναμικές γραμμές της διακύμανσης της ταχύτητας του νερού στο πεδίο ροής.....	84
Εικόνα 5.1-3: Τρισδιάστατη άποψη των ταχυτήτων του πεδίου ροής. Πάνω οι πειραματικές μετρήσεις της ταχύτητας και κάτω οι ταχύτητες που προκύπτουν ως αποτέλεσμα του υδροδυναμικού μοντέλου.	85
Εικόνα 5.1-4: Κατανομή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k στο πεδίο ροής (σε μονάδες J/kg).	85
Εικόνα 5.1-5: Κατανομή της απόσβεσης ε της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k στο πεδίο ροής (σε μονάδες J/kg*s).....	86
Εικόνα 5.1-6: 16 πειραματικές τροχιές ιχθύων σε συνδυασμό με την κατανομή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας στο πεδίο ροής.	88
Εικόνα 5.2-1: Τροχιές ιχθύων με τις προκαθορισμένες (default) τιμές παραμέτρων για τις θέσεις A και B.....	91

Εικόνα 5.2-2: Τροχιές ιχθύων με τις προκαθορισμένες (default) τιμές παραμέτρων. Οι 100 διαφορετικές θέσεις εκκίνησης συμβολίζονται με τις πράσινες κουκκίδες και οι τελικές θέσεις των τροχιών με τις κόκκινες κουκκίδες.	92
Εικόνα 5.2-3: Θέση Α/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 1: μείωση της τιμής κατωφλιού της Β2 (threshold(2)) από 0.84 σε 0.42 και σε 0.0.	93
Εικόνα 5.2-4: Θέση Β/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 1: μείωση της τιμής κατωφλιού της Β2 (threshold(2)) από 0.84 σε 0.42 και σε 0.0.	93
Εικόνα 5.2-5: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 1 : μείωση της τιμής κατωφλιού της Β2 (threshold(2)) από 0.84 σε 0.42.	94
Εικόνα 5.2-6: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 1 : μείωση της τιμής κατωφλιού της Β2 (threshold(2)) από 0.84 σε 0.0.	94
Εικόνα 5.2-7 : Θέση Α/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 2: μείωση της τιμής κατωφλιού της Β3 (threshold(3)) από 0.90 σε 0.45 και σε 0.0.	95
Εικόνα 5.2-8: Θέση Β/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 2: μείωση της τιμής κατωφλιού της Β3 (threshold(3)) από 0.90 σε 0.45 και σε 0.0.	95
Εικόνα 5.2-9: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 2 : μείωση της τιμής κατωφλιού της Β3 (threshold(3)) από 0.90 σε 0.45.	96
Εικόνα 5.2-10: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 2: μείωση της τιμής κατωφλιού της Β3 (threshold(3)) από 0.90 σε 0.0.	96
Εικόνα 5.2-11: Θέση Α/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 3: μείωση του συντελεστή μνήμης της Β1 (memory behavior coefficient(1)) από 1.0 σε 0.99, 0.98, 0.97, 0.80, 0.40 και σε 0.0.	97
Εικόνα 5.2-12: Θέση Β/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 3: μείωση του συντελεστή μνήμης της Β1 (memory behavior coefficient(1)) από 1.0 σε 0.99, 0.98, 0.97, 0.80, 0.40 και σε 0.0.	97
Εικόνα 5.2-13: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 3: μείωση του συντελεστή μνήμης της Β1 (memory behavior coefficient(1)) από 1.0 σε 0.0.....	98
Εικόνα 5.2-14: Θέση Α/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 4: αύξηση του συντελεστή μνήμης της Β2 (memory behavior coefficient(2)) από 0.0 σε 0.40, 0.80, 0.97, 0.98, 0.99 και σε 1.0.	98
Εικόνα 5.2-15: Θέση Β/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 4: αύξηση του συντελεστή μνήμης της Β2 (memory behavior coefficient(2)) από 0.0 σε 0.40, 0.8, 0.97, 0.98, 0.99 και σε 1.0.	99
Εικόνα 5.2-16: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 4: αύξηση του συντελεστή μνήμης της Β2 (memory behavior coefficient(2)) από 0.0 σε 0.50.....	100
Εικόνα 5.2-17: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 4: αύξηση του συντελεστή μνήμης της Β2 (memory behavior coefficient(2)) από 0.0 σε 1.0.....	100
Εικόνα 5.2-18: Θέση Α/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 5: μείωση του συντελεστή μνήμης της Β3 (memory behavior coefficient(3)) από 1.0 σε 0.99, 0.98, 0.97, 0.80, 0.40 και σε 0.0.	101
Εικόνα 5.2-19: Θέση Β/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 5: μείωση του συντελεστή μνήμης της Β3 (memory behavior coefficient(3)) από 1.0 σε 0.99, 0.98, 0.97, 0.80, 0.40 και σε 0.0.	101
Εικόνα 5.2-20: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 5: μείωση του συντελεστή μνήμης της Β3 (memory behavior coefficient(3)) από 1.0 σε 0.0.....	102
Εικόνα 5.2-21: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 5: μείωση του συντελεστή μνήμης της Β3 (memory behavior coefficient(3)) από 1.0 σε 0.40.....	102

Εικόνα 5.2-22: Θέση Α/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 6: μείωση του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας της Β1 (intrinsic utility (1)) από 1.0 σε 0.90, 0.50 και σε 0.0.	103
Εικόνα 5.2-23: Θέση Β/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 6: μείωση του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας της Β1 (intrinsic utility (1)) από 1.0 σε 0.90, 0.50 και σε 0.0.	103
Εικόνα 5.2-24: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 6: μείωση του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας της Β1 (intrinsic utility (1)) από 1.0 σε 0.0.	104
Εικόνα 5.2-25: Θέση Α/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 7: αύξηση του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας της Β2 (intrinsic utility (2)) από 0.5 σε 0.80 και 1. 0 και μείωση σε 0.0.	104
Εικόνα 5.2-26: Θέση Β/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 7: αύξηση του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας της Β2 (intrinsic utility (2)) από 0.5 σε 0.80 και 1.0 και μείωση σε 0.0.	105
Εικόνα 5.2-27: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 7: μείωση της τιμής της εσωτερικής χρησιμότητας της Β2 (intrinsic utility (2)) από 0.5 σε 0.0.	105
Εικόνα 5.2-28: Θέση Α/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 8: μείωση του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας της Β2 (intrinsic utility (2)) από 1.0 σε 0.80, 0.50 και σε 0.0.	106
Εικόνα 5.2-29: Θέση Β/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 8: μείωση του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας της Β3 (intrinsic utility (3)) από 1.0 σε 0.80, 0.50 και σε 0.0.	106
Εικόνα 5.2-30: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 8: μείωση της τιμής της εσωτερικής χρησιμότητας της Β2 (intrinsic utility (2)) από 1.0 σε 0.0.	107
Εικόνα 5.2-31 Προσομοιωμένες τροχιές ιχθύων με θέσεις εκκίνησης αυτές των πειραματικών τροχιών και με τις προκαθορισμένες τιμές στις παραμέτρους του μοντέλου (default).	110
Εικόνα 5.2-32: Για την θέση εκκίνησης 1 οι 5 τροχιές ιχθύων από τις 66.	111
Εικόνα 5.2-33: Για την θέση εκκίνησης 1 οι 5 τροχιές ιχθύων από τις 34.	112
Εικόνα 5.2-34: Για την θέση εκκίνησης 2 οι 5 τροχιές ιχθύων από τις 66.	112
Εικόνα 5.2-35: Για την θέση εκκίνησης 2 οι 5 τροχιές ιχθύων από τις 34.	113
Εικόνα 5.2-36: Για την θέση εκκίνησης 3 οι 4 τροχιές ιχθύων από τις 66.	113
Εικόνα 5.2-37: Για την θέση εκκίνησης 3 οι 4 τροχιές ιχθύων από τις 34.	113
Εικόνα 5.2-38: Για την θέση εκκίνησης 4 οι 5 τροχιές ιχθύων από τις 66.	114
Εικόνα 5.2-39: Για την θέση εκκίνησης 4 οι 5 τροχιές ιχθύων από τις 34.	114
Εικόνα 5.2-40: Για την θέση εκκίνησης 5 οι 5 τροχιές ιχθύων από τις 66.	115
Εικόνα 5.2-41: Για την θέση εκκίνησης 4 οι 5 τροχιές ιχθύων από τις 34.	115
Εικόνα 5.2-42: Για την θέση εκκίνησης 6 οι 4 τροχιές ιχθύων από τις 66.	116
Εικόνα 5.2-43: Για την θέση εκκίνησης 6 οι 5 τροχιές ιχθύων από τις 34.	116
Εικόνα 5.2-44: Για την θέση εκκίνησης 7 οι 5 τροχιές ιχθύων από τις 66.	117
Εικόνα 5.2-45: Για την θέση εκκίνησης 7 οι 4 τροχιές ιχθύων από τις 34.	117

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 3.3-1: Τιμές προσαρμογής συντελεστών τραχύτητας πυθμένα ποταμού σύμφωνα με την USGS.	51
Πίνακας 3.4-1: Απόκλιση (RMSE) και συσχέτιση (IA) τιμών των προφίλ ταχυτήτων μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και της προσομοίωσης στη διατομή εισόδου στα ανάντη της περιοχής μελέτης.	56
Πίνακας 3.4-2: Απόκλιση (RMSE) και συσχέτιση (IA) τιμών των προφίλ ταχυτήτων μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και της προσομοίωσης στη διατομή της εισόδου στο fish farm της περιοχής μελέτης.	57
Πίνακας 3.4-3: Απόκλιση (RMSE) και συσχέτιση (IA) τιμών των προφίλ ταχυτήτων μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και της προσομοίωσης στη διατομή εξόδου στα κατόντη της περιοχής μελέτης.	58
Πίνακας 3.4-4: Χαρακτηριστικά διαφορετικών υπολογιστικών πλεγμάτων που χρησιμοποιούνται για την ανεξαρτησία πλέγματος.	58
Πίνακας 3.4-5: Συσχέτιση (IA) και απόκλιση (RMSE) τιμών των προφίλ ταχυτήτων μεταξύ των διαφορετικών πλεγμάτων που χρησιμοποιούνται για την ανεξαρτησία πλέγματος στη διατομή εισόδου της περιοχής μελέτης.	60
Πίνακας 3.4-6: Συσχέτιση (IA) και απόκλιση (RMSE) τιμών των προφίλ ταχυτήτων μεταξύ των διαφορετικών πλεγμάτων που χρησιμοποιούνται για την ανεξαρτησία πλέγματος στη διατομή εισόδου του fish farm της περιοχής μελέτης.	61
Πίνακας 3.4-7: Συσχέτιση (IA) και απόκλιση (RMSE) τιμών των προφίλ ταχυτήτων μεταξύ των διαφορετικών πλεγμάτων που χρησιμοποιούνται για την ανεξαρτησία πλέγματος στη διατομή εξόδου στα κατόντη της περιοχής μελέτης.	61
Πίνακας 4.1-1: Χαρακτηριστικά δομημένου πλέγματος που χρησιμοποιείται για την εισαγωγή των δεδομένων (ταχύτητα και συντεταγμένες X,Y κόμβων) στο μοντέλο ιχθύων...	62
Πίνακας 4.1-2: Συσχέτιση (IA)και απόκλιση (RMSE) τιμών των προφίλ ταχυτήτων μεταξύ δομημένου και μη δομημένου πλέγματος στη διατομή εισόδου ανάντη της περιοχής μελέτης.	63
Πίνακας 4.1-3: Συσχέτιση (IA)και απόκλιση (RMSE) τιμών των προφίλ ταχυτήτων μεταξύ δομημένου και μη δομημένου πλέγματος στη διατομή εισόδου στο fish farm της περιοχής μελέτης.	64
Πίνακας 4.1-4: Συσχέτιση (IA)και απόκλιση (RMSE) τιμών των προφίλ ταχυτήτων μεταξύ δομημένου και μη δομημένου πλέγματος στη διατομή εξόδου κατόντη της περιοχής μελέτης.	64
Πίνακας 4.4-2: Μετατροπή συντεταγμένων των υδροφώνων που βρίσκονται στο ποτάμι. Οι θέσεις ως προς την απεικόνιση αναφέρονται στις κόκκινες κουκίδες που φαίνονται στην εικόνα 4.4-1. Στις πρώτες 4 γραμμές οι συντεταγμένες στην αρχική τους μορφή (μετά τον υπολογισμό από ft σε m) και η μετατροπή τους σε UTM στις 4 τελευταίες γραμμές.	73
Πίνακας 5.2-1: Προκαθορισμένες τιμές παραμέτρων του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων..	90
Πίνακας 5.2-2: Θέσεις εκκίνησης ιχθύων οι οποίες προέρχονται από τις πειραματικές τροχιές και χρησιμοποιούνται σε όλες τις προσομοιώσεις της εφαρμογής του μοντέλου.	110

Πίνακας 5.2-3: Τιμές παραμέτρων που επιλέγονται για την εφαρμογή του μοντέλου ιχθύων.
..... **111**

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του ΔΠΜΣ 'Επιστήμη και Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων' στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, υπό την επίβλεψη του κ. καθηγητή Αναστάσιου Ι. Στάμου.

Θα ήθελα αρχικά να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα Καθηγητή ΕΜΠ κ. Αναστάσιο Ι. Στάμου, για την διαρκή καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές καθώς και τον χρόνο που αφιέρωσε κατά την διαδικασία εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Έπειτα, να ευχαριστήσω τους Υποψήφιους Διδάκτορες κα. Γεωργία Παπαδονικολάκη, κ. Γεώργιο Τζάνε, κ. Χρήστο Θεωδορόπουλο και κυρίως τον κ. Γεώργιο Μητσόπουλο, για όλες τις επικοινωνητικές συζητήσεις που αφορούσαν την επίλυση των εκάστοτε προβλημάτων καθώς και τη συνολική τους συνδρομή για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω του συμφοιτητές μου Κωνσταντίνο Μαυρογεώργο και Ιωάννα Ζέρβα για την πολύτιμη βοήθεια τους. Επίσης, τον φίλο και συνάδελφο Γεώργιο Παμφίλη για την συνδρομή του.

Τέλος, οφείλω το μεγαλύτερο ευχαριστώ στην οικογένεια μου και κυρίως στον πατέρα μου και συνάδελφο Παναγιώτη Οικονομόπουλο, όπως επίσης και σε όλους τους αγαπημένους μου ανθρώπους, για τη βοήθεια και την υποστήριξη που μου παρέχουν σε όλα τα βήματα μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο κύριος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου με το οποίο θα είναι εφικτή η προσομοίωση της συμπεριφοράς και της κίνησης των ιχθύων σε διόδους ιχθύων σε περιοχές φραγμάτων ποταμών. Οι συμπεριφορές που ακολουθούν οι ιχθύες σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία είναι οι εξής: 1) κολύμβηση με την κατεύθυνση της ροής, 2) παρατεταμένη κολύμβηση προς τις υψηλότερες ταχύτητες και 3) κολύμβηση αντίθετα στη ροή. Το παρόν μαθηματικό μοντέλο βασίστηκε σε προηγούμενη μεταπτυχιακή διατριβή και τροποποιήθηκε σε κάποιες λεπτομέρειες που αφορούν την χωρική κατανομή που καλύπτει ο ιχθύς κατά την κίνηση του και όχι στον βασικό κορμό που περιγράφει τη συμπεριφορά των ιχθύων. Πιο αναλυτικά, το μοντέλο βασίζεται στο γεγονός ότι οι ιχθύες λαμβάνουν υπόψη τους τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής και με βάση αυτά αποφασίζουν τη συμπεριφορά που θα ακολουθήσουν. Επιλέγεται περιοχή μελέτης για την οποία υπάρχουν πειραματικά δεδομένα τροχιών ιχθύων ώστε να γίνει προσπάθεια εφαρμογής του μοντέλου με βάση τις τροχιές αυτές. Αρχικά, με τη βοήθεια του προγράμματος υπολογιστικής υδροδυναμικής Telemac-2D έγινε βαθμονόμηση του υδροδυναμικού μοντέλου του πεδίου ροής της περιοχής μελέτης με βάση τις μετρήσεις παροχών που καταγράφονται πειραματικά. Από την υδροδυναμική προσομοίωση λαμβάνονται τα αποτελέσματα των ταχυτήτων του πεδίου ροής, από τα οποία υπολογίζονται οι επιταχύνσεις του πεδίου ροής που αποτελούν το βασικό ερέθισμα της συμπεριφοράς των ιχθύων και άρα δεδομένα εισόδου στο μοντέλο ιχθύων. Στη συνέχεια, όπως αναφέρεται παραπάνω, έγιναν τροποποιήσεις στο μοντέλο ώστε να αντιμετωπιστούν προβλήματα της χωρικής έκτασης που καταλαμβάνουν οι ιχθύες, όπως ο περιορισμός τους μέσα στα υδάτινα όρια του ποταμού και όχι εκτός των οχθών. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις δισδιάστατης κίνησης ιχθύων με διαφορετικές θέσεις εκκίνησης του ιχθύος, συμπεριλαμβανομένων των θέσεων εκκίνησης από τις πειραματικές μετρήσεις παρακολούθησης και καταγραφής πραγματικών ιχθύων στο πεδίο. Οι πειραματικές μετρήσεις περιλαμβάνουν τροχιές ιχθύων σε μορφή X και Y συντεταγμένων, οι οποίες λήφθηκαν με τη βοήθεια υδροφώνων που ήταν τοποθετημένα στην περιοχή μελέτης και λειτούργησαν ως δέκτες σήματος από τους πομπούς που είχαν τοποθετηθεί στους μελετώμενους ιχθύες. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας στις παραμέτρους του μοντέλου, ώστε να καθοριστεί από ποιες παραμέτρους εξαρτάται η συμπεριφορά ιχθύων, όπως οι τιμές κατωφλιού οι οποίες αν ξεπεραστούν ενεργοποιείται η εκάστοτε συμπεριφορά, αφού ο ιχθύς θα έχει αντιληφθεί διαφορά ανάμεσα στην επιτάχυνση που έχει εγκλιματιστεί και στην επιτάχυνση που δέχεται. Επίσης, σημαντικοί αποδεικνύονται οι συντελεστές μνήμης κάθε συμπεριφοράς οι οποίοι μεταφέρουν πληροφορία στον ιχθύ από την προηγούμενη χρονική στιγμή στην επόμενη και καθορίζουν αν ο ιχθύς θα συνεχίσει να ακολουθεί μια συμπεριφορά. Ακόμη, με βάση το είδος του ιχθύος που εξετάζεται, το οποίο είναι ο Ατλαντικός Σολομός, κατασκευάστηκαν οι καμπύλες καταλληλότητας ταχύτητας και βάθους νερού με βάση την περιοχή μελέτης. Τέλος, όσον αφορά τα συμπεράσματα, προκύπτει ότι το μοντέλο συμπεριφοράς ιχθύων προσομοιώνει τη γενική συμπεριφορά του συνόλου των πειραματικών ιχθύων, αλλά η ακριβής προσομοίωση των πειραματικών τροχιών δεν είναι δυνατή καθώς η κίνηση τους βασίζεται αρκετά στον παράγοντα της τυχαιότητας.

ABSTRACT

The scope of the present work is to implement an existing mathematical model that simulates fish behavior and movement through fish passages in river flows. Fish behavior, as studied and referenced in literature, consists mainly of three behaviors; 1) fish swims along with the flow, which is a biased correlated random walk (BCRW) in the direction of the flow, 2) fish swims towards regions of faster flows thus facilitating downstream migration through obstacle avoidance and 3) fish swims against flow vector, which is an escape response, where fish abandons downstream migration to swim upstream. This mathematical fish behavior model is based on the fact that fish behavior is triggered from hydrodynamic stimuli and specifically water acceleration magnitude. In order to implement the fish model based on the hydrodynamic stimuli, a case study area is used, which is a river in the area of Jedsted in Denmark, where fish movement data were recorded and available. Data of bathymetry and water velocity were also available and used for simulating the hydrodynamic flow field of the case study area. To simulate the hydrodynamic flow, a hydrodynamic model is set up and validated with the use of a computational fluid mechanics (CFD) model, Telemac-2D in particular. Velocity data derived from the hydrodynamic model is used for calculating water acceleration. Water acceleration is then used as an input in fish behavior model. Sensitivity analysis is performed in order to determine the parameters of the fish model that most affect fish behavior. After defining the most important parameters of the model, an implementation of the fish model is attempted. A set of values of the most important parameters is then selected and applied to simulate experimental fish trajectories. The results indicate that the model succeeds to simulate milling and non-milling fish behavior activating a combination of the three behaviors that are mentioned above. In particular, non-milling behavior corresponds to 1st behavior and swimming with the direction of the flow and non-milling behavior corresponds to a combination of 1st, 2nd and 3rd behavior with the fish experiencing sudden changes in direction during its movement. Experimental fish trajectories are not exactly simulated but the main goal of simulating fish behavior which appears during the experiment on the case study area is succeeded.

Keywords: *Fish behavior, fish behavior modelling, fish passages, ecological modelling*

Extended Abstract

Introduction

The increasing demand for water, as a key element of life for various uses, urgently requires the need for better management of water resources. Within this context, with the simultaneous growing exploitation of water through the construction of hydraulic works, such as dams, irrigation systems, water abstraction and constructions along the rivers, an ecological problem arises regarding to aquatic ecosystems. More specifically, the issue of fish downstream migration through a river separated by hydraulic structures, which results in modification of the river connectivity as well as the flow field regime, and how the process of migration is affected. Engineers have created artificial passages, the fish passages, to address this issue. Fish passages play an important role in protecting fish, but their design is complex as it takes into account hydraulic design criteria, fish speed preferences in the passage and estimations of fish mortality.

In Europe and worldwide legislative frameworks have been created in order to accomplish 'a good ecological status' of water resources. Within this context, fish paths are included, as their proper study and implementation are crucial for the conservation of migratory fish populations and thus for the overall conservation of the ecosystem. Better design of fish passages firstly requires understanding the behavior of the fish. Mathematical models can be very effective tools through which fish behavior can be approached and studied. In the present work fish behavior is approached through the use of an existing mathematical model from a previous master thesis which is based on the Eulerian-Lagrangian Agent Method (ELAM) model from the study of Goodwin et al (2014). This mathematical fish behavior model is based on the fact that fish behavior is triggered from hydrodynamic stimuli and specifically water acceleration magnitude. Fish behavior, simulated in the present fish model, consists mainly of three behaviors; 1) fish swims along with the flow, which is a biased correlated random walk (BCRW) in the direction of the flow, 2) fish swims towards regions of faster flows thus facilitating downstream migration through obstacle avoidance and 3) fish swims against flow vector, which is an escape response, where fish abandons downstream migration to swim upstream. Behaviors 2 and 3 are associated with changes in water acceleration magnitude as a stimulus. In order to implement the fish model based on the hydrodynamic stimuli, a case study area is used, which is a river in the area of Jedsted in Denmark, where fish movement data were recorded and available. Data of bathymetry and water velocity were also available and used for simulating the hydrodynamic flow field of the case study area. To simulate the hydrodynamic flow, a hydrodynamic model is set up and validated with the use of a computational fluid mechanics (CFD) model, Telemac-2D in particular. Telemac-2D solves the Saint-Venant equations using finite elements and the k-E turbulence model for calculating turbulent kinetic energy. Velocity data derived from the hydrodynamic model is used for calculating water acceleration magnitude. Water acceleration is then used as an input in fish behavior model. The

goal is to simulate fish trajectories from the experimental fish movement data by implementing the fish model.

Parts and methodology of the present work

Methodology

The present work consists of a) a background literature review of existing mathematical fish behavior models, b) presenting the case study area, processing bathymetry and velocity experimental data and setting up and validating the hydrodynamic model in order to retrieve water velocity data of the flow field, c) presentation of the fish model, experimental fish trajectories conversion from an unknown coordinate system into the UTM (Universal Transverse Mercator) coordinate system which is currently used and calculation of Habitat Suitability Indexes of the case study area corresponding to Atlantic Salmon in smolt phase preferences in water velocity and water depth, e) performing sensitivity analysis in order to determine the most important parameters that affect fish behavior and f) implementing fish model by adjusting the set of the most important parameters to simulate experimental fish trajectories.

Basic principles of the fish model

1. Main stimulus. Fish, which are considered as 2D in the present work, perceive water acceleration magnitude A_M of the flow field as the main hydrodynamic stimulus. Acceleration is simulated in a logarithmic unitless scale as I_A . A_M and I_A are given as:

$$A_M^t = \sqrt{\left(U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x}\right)^2 + \left(U \frac{\partial V}{\partial y} + V \frac{\partial U}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

$$I^t = \log_{10} \frac{A_M^t}{A_0} \quad (2)$$

Where U and V are the velocities of X and Y direction respectively in a Cartesian coordinate system and t the current calculation time.

2. Basic behaviors. When fish perceive hydrodynamic stimuli, they follow one of the three behaviors: (B1) fish swim with the direction of the flow, (B2) fish swim towards faster flow velocities switching direction and (B3) fish swim against the flow vector. At first, fish choose a behavior based on a detection metric. If the detection metric exceeds a threshold an event is occurred and a behavior is chosen. The chosen behavior is then confirmed or denied by a decision metric.
3. Sensory ovoid. The circular or ellipsoid surrounding area of the fish inside which the fish perceive changes is called sensory ovoid. It consists of 5 sensory points. The 1st one is considered to be the center of the fish, the other 2 points are on the X direction and the rest ones are on the Y direction. If the fish is simulated in 3 dimension there are 2 more sensory points above and below the fish.

Calculation steps

1. Input data to the fish model. A structured computational mesh of the case study area with 10260 nodes and velocity values of X and Y direction on every node (derived from the hydrodynamic model) is given as a prior data to the fish model. Other necessary coefficients, time step, number of iterations and fish characteristics, such as fish length, first fish's position etc. are also given as data to the model.
2. Calculation of the water acceleration magnitude for every node of the mesh using (1) equation.
3. Calculation distances of sensory points from the center of the fish, having the center of the fish the main point for the local coordinate system. After that they get converted into the Cartesian coordinate system using a rotation vector. Sensory point distances (SQD_{x,y}) are calculated as the displacement from the location of the fish with a procedure that consists of sensory point distance (SPDIST), random increase of sensory point distance (RINC) and stochastic noise to sensory point locations by adding range of variability to non-cardinal locations (RND). Equations (3), (4), (5) and (6) describe all the above.

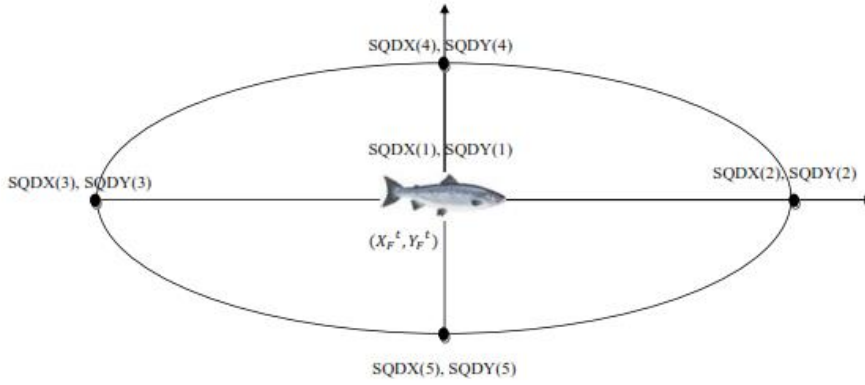


Figure 1: Sensory ovoid.

$$SPDIST = \frac{ncoeff}{I_A} = \frac{ncoeff}{\log_{10} \frac{A_M}{A_0}} \quad (3)$$

$$RINC = 1 + RRSQD * Delta \quad (4)$$

$$RND = (2 * RRSQD - 1) * coeff_{40} \quad (5)$$

$$SQD_{X,Y} = \pm SPDIST * RINC \quad \vee \quad SQD_{X,Y} = \pm SPDIST * RND \quad (6)$$

4. Determining the decision of the final behavior chosen by the fish. Next step is to calculate the detection metric and the decision metric. Detection metric basically detects perceived changes in intensity of the water acceleration based on Weber's 'just noticeable difference':

$$Detection\ Metric = \frac{I_a^t - I_a^t}{I_a^t} \quad (7)$$

When a change is detected, detection metric exceeds a threshold that is given for behaviors B2 and B3 an event of possible behavior decision is occurred.

$$D.Metric = \frac{I^t - I_a^t}{I_a^t} \geq k_i(threshold) \rightarrow E^t (event) \quad (8)$$

Where $I^t = \log_{10} \frac{A_M^t}{A_0}$ (2) and

$$I_a^t = (1 - m_{acclimatization}) * I^t + m_{acclimatization} * I_a^t * (t - 1) \quad (9)$$

I^t is the perceived intensity of stimulus, in this case water acceleration magnitude, at the individual's (fish) position at time t, I_a^t is perceived intensity of stimulus to which the individual is acclimatizes and $m_{acclimatization}$ is a coefficient within [0,1] scaling how quickly the individual acclimatizes to new intensities of the stimulus. After having found which behavior decisions are active and possible, a utility function is given for each behavior based on a probability of selecting each behavior. Finally, the behavior with the greatest utility value for the fish is selected. Probability for each behavior is given as:

$$P_B^t = (1 - m_{mem}) * E^t + m_{mem} * P_B^t * (t - 1) \quad (10)$$

Where m_{mem} memory coefficient integrates the amount of pasta information into the next decision following the notion that intensity or duration of activity in sensory neurons needs to pass a threshold to reach awareness. The behavior decision is then based on an objective function, utility, where each decision in the set of alternatives B{1,2,3} has an associated expected utility:

$$U_B^t = P_B^t * u_B^t \quad (11)$$

Where u_B^t is the subjective intrinsic utility value of behavior B[j] in realizing the goal, i.e., reduction of perceived change in stimulus. When the expected utility of a certain behavior becomes maximum then this behavior gets activated and the decision metric for this behavior increases by 1.

$$U^t = U_{max}^t \xrightarrow{then} Decision_{B1,B2,B3} = 1$$

5. Calculation of vectors U_{fisf} and V_{fish} in X and Y direction respectively of fish's velocity.
6. Calculate the new position X_{fish} , Y_{fish} and the direction of the fish. The model also checks if fish's position is maintained inside the river boundaries and the computational boundaries.

$$X_F^{t+dt} = X_F^t + (U_F^t + U^t) * dt \quad (12)$$

$$Y_F^{t+dt} = Y_F^t + (V_F^t + V^t) * dt \quad (13)$$

Case study area

The case area was chosen based on the availability of fish movement data. The area is located in Western Denmark and specifically in the Jedsted Mill fish farm area. The model is applied on a part of the Konge river 7km upstream of the Wadden sea. A standard sharp-crested weir is placed 90 m downstream of the Jedsted Mill fish farm to divert water into the fish farm through a water withdrawal zone. Bathymetry, mean velocities and fish movement data were given. Atlantic Salmon in smolt phase was the fish that the researchers used in the experiments. Flow discharges are calculated based on the bathymetry and velocity data. Three cross sections are chosen to calculate discharges and in particular; 1st cross section on the right side of the area, which is considered as the entrance, 2nd cross section which is on the water withdrawal zone in fish farm's entrance and 3rd cross section which is considered as the exit of the case study area.



Figure 2: Bathymetry and velocity contour lines of the case study area from left to right respectively.

The substrate of the Konge River in the area of interest was also determined in order to obtain roughness coefficients for simulating river flow. The river bed is mainly sand, interspersed with scattered areas covered by gravel. Furthermore, when the Atlantic Salmon were tracked, vegetation of the river was dense, comprised of *Spargarium erectum* with 50% coverage.

Measurements of fish trajectories

Atlantic Salmon smolts were tagged and tracked 2-dimensionally (x, y coordinates) using an array of four hydrophones positioned near the water withdrawal zone.

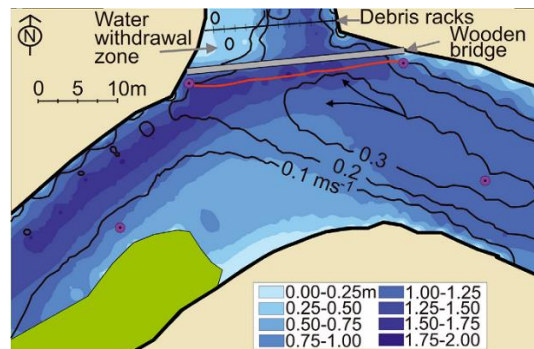


Figure 3: Case study area. The purple points indicate the 4 hydrophones.

Fish trajectories were recorded in an unknown coordinate system based on US feet. In order to process these trajectories a conversion is needed. Initially, trajectories are converted from feet to meters using the ratio $\frac{1\text{ ft}}{1\text{ m}} = 0.3048$. Subsequently, the above picture (figure 3) is used as a base to match the hydrophone's coordinates in UTM system, as these coordinates were already available in the US feet coordinate system, which get converted using the above ratio. As a result, hydrophone coordinates are known in UTM system in meters and in unknown system also in meters. Using these points as a reference an affine transformation is applied in order to transform trajectories in UTM system.

HYDROPHONE POSITIONS		
Positions in unknown coordinate system after converting from ft to m		
Number of hydrophones	X (m)	Y (m)
1	6232566.49	1390317.40
2	6232588.90	1390330.45
3	6232564.51	1390297.65
4	6232603.07	1390319.99
Positions in UTM		
1	482978.90	6138501.50
2	483006.70	6138504.20
3	482970.00	6138482.80
4	483017.30	6138489.00

Affine transformation works as a geographical adjustment and is calculated through a system of linear equations:

$$X = ax + by + c \quad (14)$$

$$Y = dx + ey + f \quad (15)$$

An indicative measured fish trajectory is presented before and after affine transformation in the figure 4 below. The trapezoid showing in figure 4 is created from the 4 hydrophones. The other line is a measured fish trajectory.

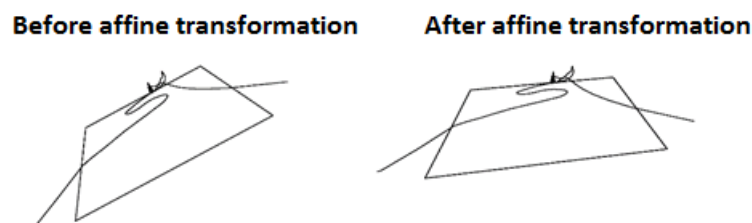


Figure 4: A measured fish trajectory before and after affine transformation.

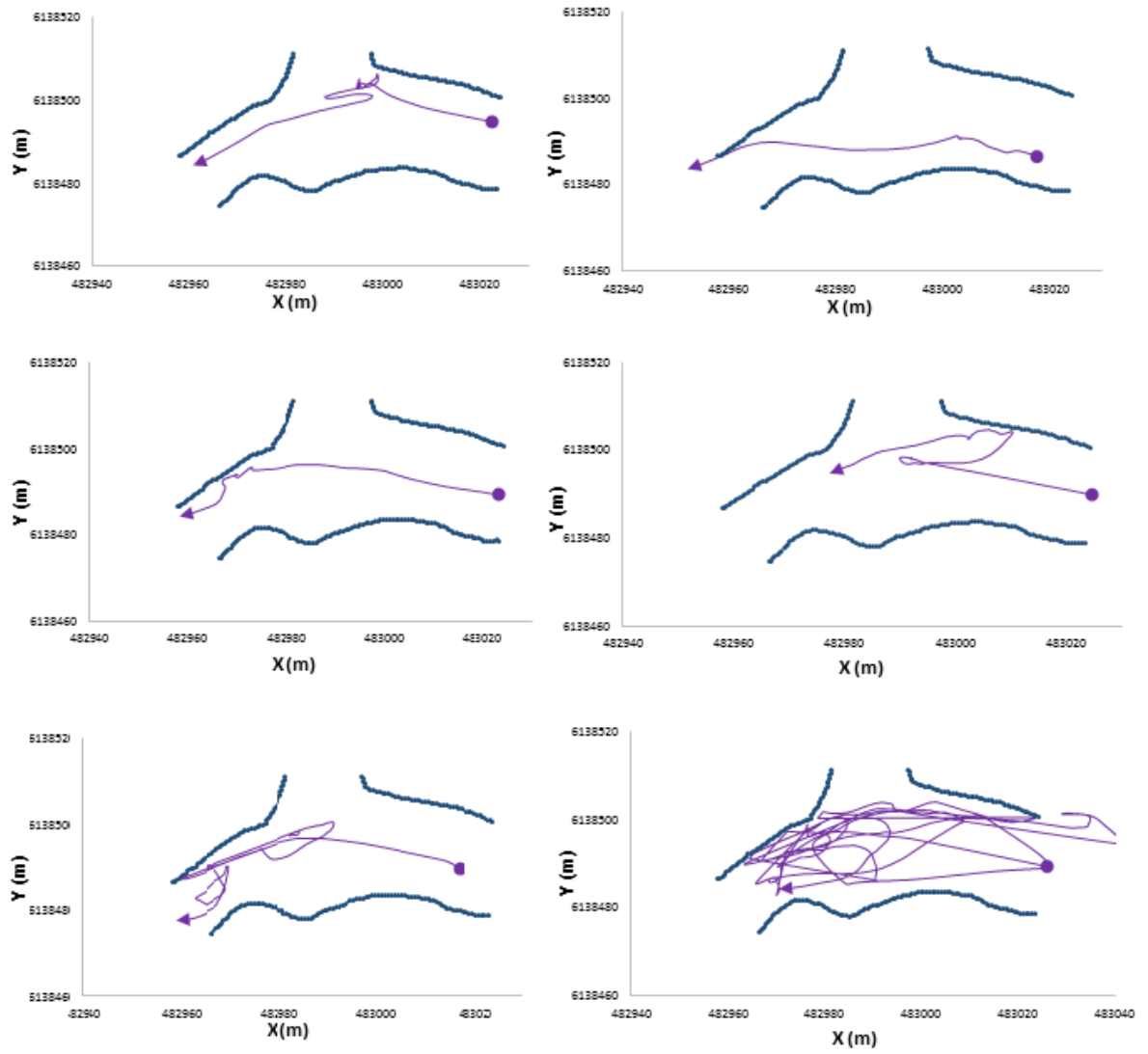


Figure 5: Indicatives measured fish trajectories after the affine transformation inside the river boundaries.

Habitat Suitability Indexes for Atlantic Salmon smolts

In the present work an attempt is made to determine preferences of Atlantic Salmon smolts in water depth, water velocity and substrate of the case study area. These preferences refer to Habitat Suitability Indexes or HSI. HSI varies within the range of [0,1], with 0 corresponding to conditions that fish prefer the least and with 1 corresponding to conditions that fish prefer the most. In modern literature there is no research about Atlantic Salmon smolts available. In contrast, studies have focused more on HSI of adult and parr Atlantic Salmon.

Based on the methodology of the type III preferences curves of Bovee's study (1986), to construct the suitability curves a programming script was created in order to count how many measured fish trajectories have passed over the X and Y points of the case study area. A counter k was used for this purpose. More specifically, the positions of each node in the computational grid is compared to positions of each fish trajectory. If there are fish positions that match with a grid node in a radius of 70cm around the grid node, then the k counter takes the value of 1. The counter receives the value only once. The counter will eventually get the value of n if n trajectories have passed over this node. This procedure is performed for all measured fish trajectories. Another counter is employed, counter A, which indicates the availability of the case study area. All points are considered to be available thus A gets the value of 1 in every point. The water depth and velocity data are then divided into classes (velocity from 0.05m/s to 0.45m/s and per 0.05m/s and water depth from 0 to 1.6m per 0.2m). The sum of k counter is calculated for each class and the total of counter A. Next, sum of k's are divided by totals of A. The class with the maximum fraction is found and all fractions are divided by the maximum to be normalized by 1 as maximum. Regarding the substrate, the classes correspond to each manning coefficient. The final suitability curves are depicted in figure 6:

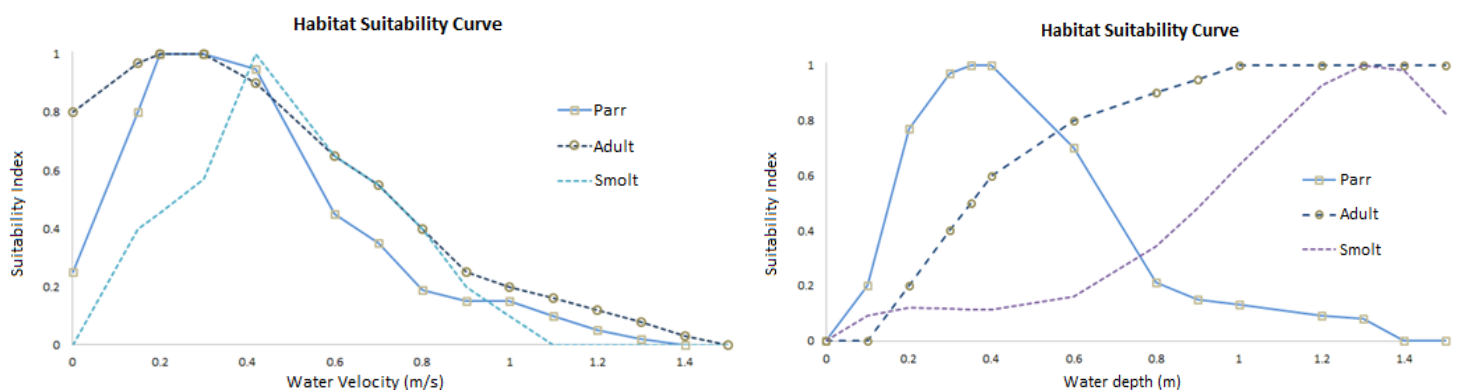


Figure 6: Water velocity suitability curve and water depth suitability curve for Atlantic Salmon smolt from left to right respectively.

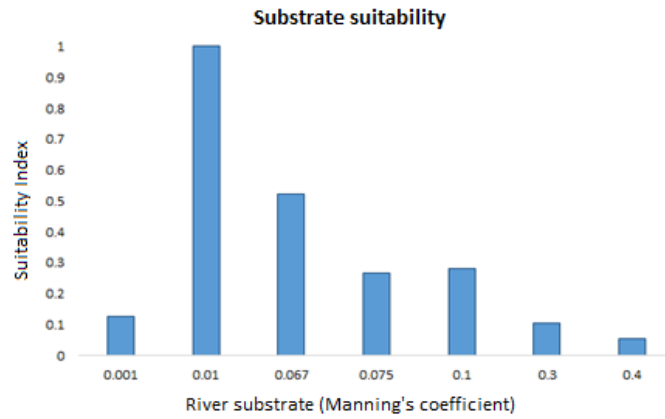


Figure 7: Substrate suitability indexes for Atlantic Salmon smolt.

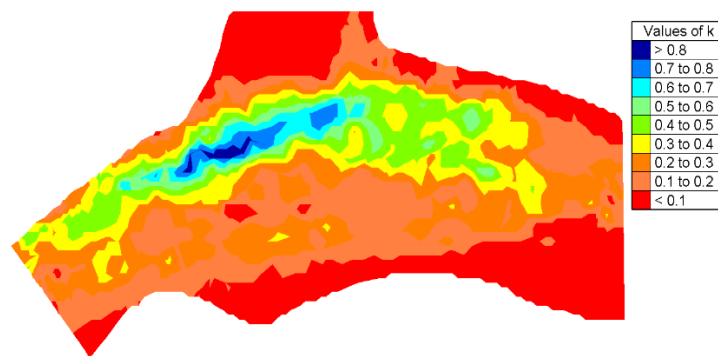


Figure 8: Distribution of counter k in the case study area. Higher values indicate more visits to these points according to measured fish trajectories.

Suitability curves for water depth and velocity are described by a polynomial equation. Utilizing these equations, the overall suitability indexes (SI) are calculated. Combining SI of water depth, water velocity and substrate the following depiction is created. Areas in yellow are an intermediate preference, area in green are the most preferable while red areas are the worst scenario for Atlantic Salmon smolts.

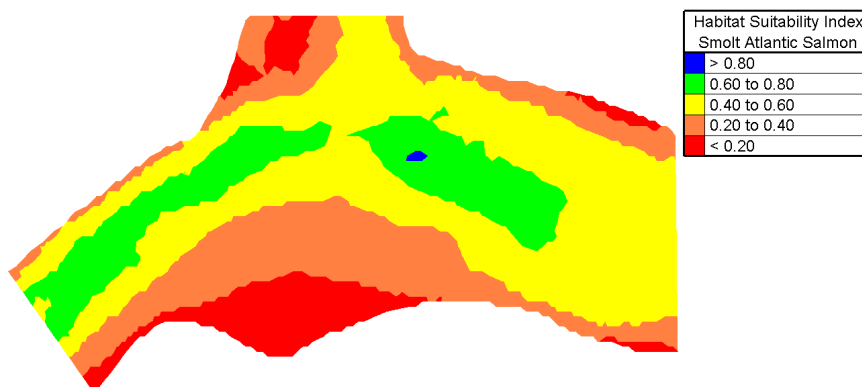


Figure 9: Overall Habitat suitability Index for Atlantic Salmon smolt.

Sensitivity analysis

Sensitivity analysis is performed on 8 parameters of the fish model in order to define the most important ones that affect fish movement the most. The method used is the 'one factor at a time' (OFAT). In OFAT analysis only one parameter changes every time while the others remain in their default values. The 8 parameters which are analyzed are: thresholds of behaviors B2, B3, memory coefficients of behaviors B1, B2, B3 and intrinsic utilities of behaviors B1, B2, B3. Starting positions are also part of the analysis in which fish from 100 starting positions are released for every scenario.

Simulations are performed for 1 fish with 2 different starting positions, position A and position B. Starting positions are from the measured fish trajectories.

Initial simulation with default parameters:

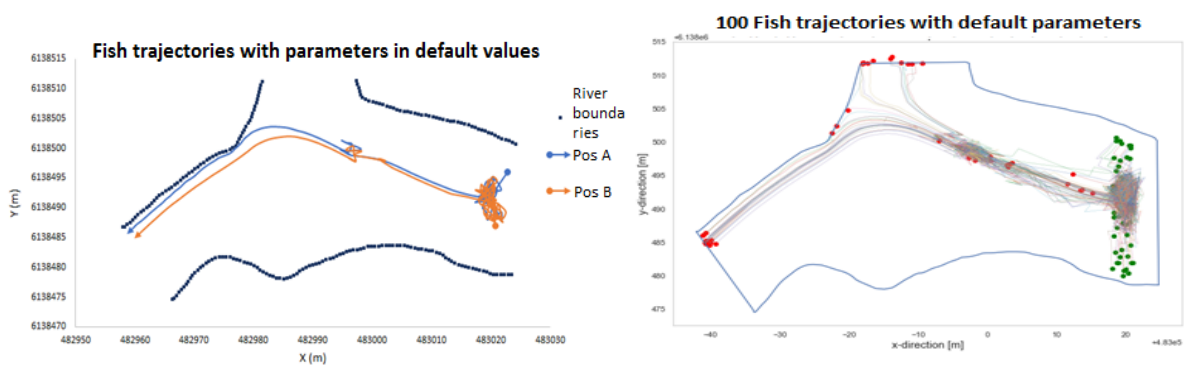


Figure 10: Fish trajectories in default parameters

The most important parameters were found to be threshold of behavior B2, memory coefficients of behaviors B1, B2 and B3 and starting points of fish trajectories.

Scenario 1/ threshold of behavior B2:

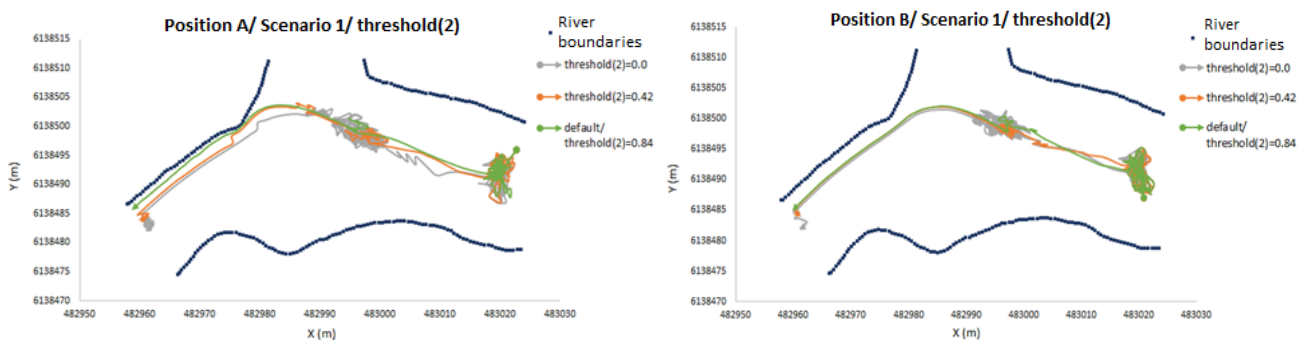


Figure 11: Reduction of threshold (2) from 0.84 to 0.42 and to 0.0. Behavior B2 is increased.

Scenario 3/ memory of behavior B1 coefficient:

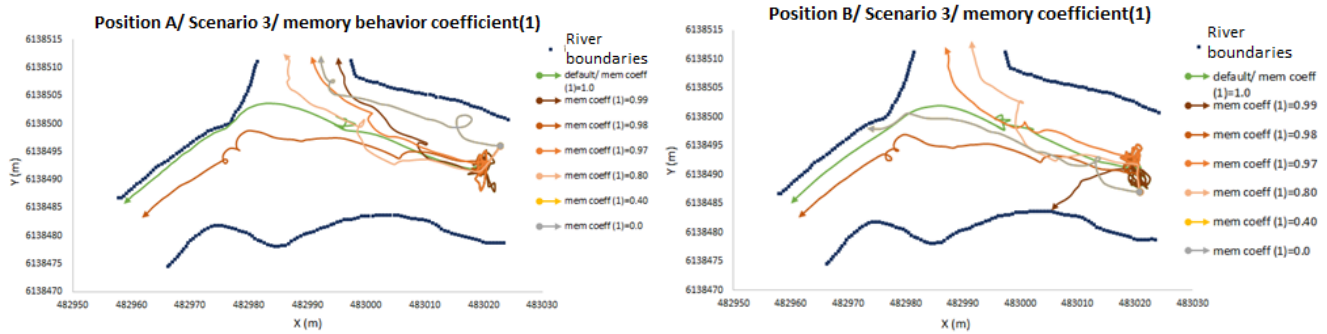


Figure 12: Reduction of memory behavior coefficient (1) from 1.0 to 0.99, 0.98, 0.97, 0.80, 0.40 and 0.0. Coefficient's reduction leads to increase of behavior B1.

Scenario 4/ memory of behavior B2 coefficient:

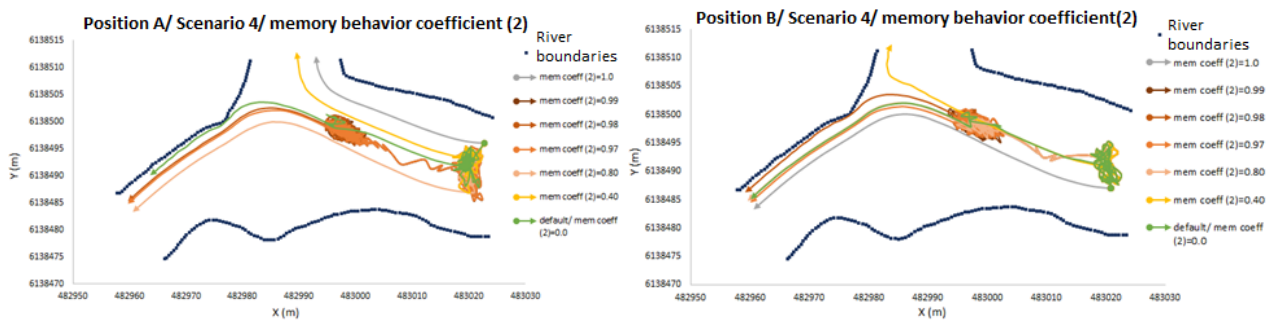


Figure 13: Increase of memory behavior coefficient (2) from 0.0 to 0.40, 0.80, 0.97, 0.98, 0.99 and 1.0. Coefficient's increase leads to reduction of behavior B2. Value of 1.0 deactivates behavior B2.

Scenario 5/ memory of behavior B3 coefficient:

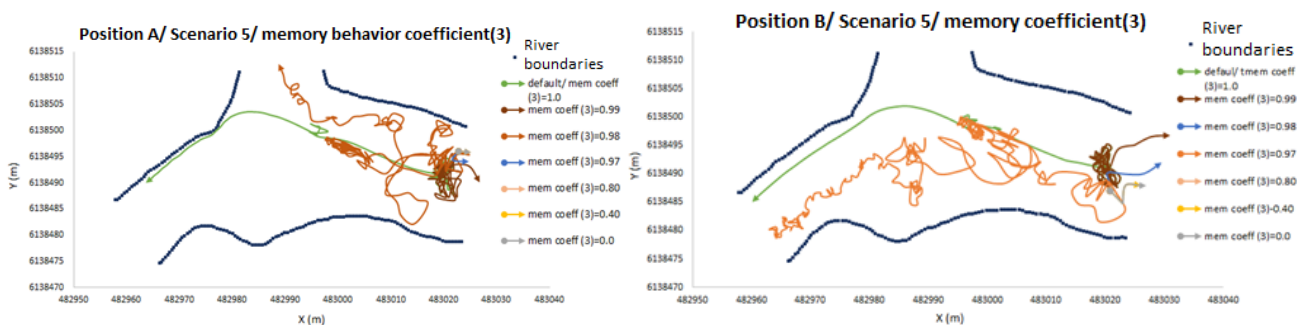


Figure 14: Reduction of memory behavior coefficient (3) from 1.0 to 0.99, 0.98, 0.97, 0.80, 0.40 and 0.0. Coefficient's reduction leads to increase of behavior B3.

Implementation of the fish model

After determining the most important parameters of the fish model that most affect fish behavior, a set of values these parameters are given in order to simulate experimental fish trajectories. From the experimental study researchers found out that from the total 61 measured fish, 41 continued downstream migration while the 20 rest of them did not. From the 41 fish 27 fish exhibited non-milling behavior which is a course without sudden changes in direction and the other 14 exhibited milling behavior which is a course with sudden changes in direction. In other words, 66% of the fish appeared to had non-milling behavior and 34% of the fish had milling behavior. Applying the set of parameters given below fish model succeeds on average of 21 measured fish trajectories to accomplish 66% of non-milling behavior and 34% of milling behavior. In each one of the 21 starting positions 100 were 'released' at the same time in order to examine the effect of different values in random, which appears in 8 equations inside the fish model. In fish model non-milling behavior corresponds to behavior B1 and milling corresponds to a combination of behaviors B1, B2 and B3.

Table 1: Set of the most important parameters in fish model used to simulate 66% non-milling behavior and 34% milling behavior.

Parameter/ coefficient	Values
Memory behavior B1 coefficient	1.00
Memory behavior B2 coefficient	0.82
Memory behavior B3 coefficient	0.99
Threshold of behavior B2	0.25

Conclusions

From the present work the following conclusions are drawn:

- Fish can perceive changes in water acceleration magnitude and then choose and activate behaviors B2 and B3. Activating these behaviors is possible through validation of the fish model.
- The current fish model succeeds to simulate the overall exhibited fish behavior of actual studied fish through a set of parameters, though it is not possible to simulate the exact experimental fish trajectories.

Future work

- Further research on the function of the current fish behavior model is needed.
- It is suggested to add a fish behavior associated to water depth to simulate fish movement in 3 dimensions also.
- Utilize other case study areas with experimental data available to implement the fish model and eventually find the key features that can be adjusted to any other case study area.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση νερού, ως βασικό στοιχείο για τη ζωή, για διάφορες χρήσεις, επιβάλλει επιτακτικά την ανάγκη για καλύτερη διαχείριση των υδατικών πόρων. Μέσα στο πλαίσιο αυτό με την ταυτόχρονη αναπτυσσόμενη εκμετάλλευση του νερού μέσω της κατασκευής υδραυλικών έργων, όπως φραγμάτων, αρδευτικών συστημάτων, άντλησης νερού και κατασκευών κατά μήκος των ποταμών, δημιουργείται ένα οικολογικό πρόβλημα όσον αφορά τα υδατικά οικοσυστήματα και ό,τι αυτά περιλαμβάνουν. Πιο συγκεκριμένα, τίθεται το θέμα της μετανάστευσης των ιχθύων από τα ανάντη προς τα κατόντη ενός ποταμού που διαχωρίζεται με υδραυλικές κατασκευές, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα να τροποποιούν τη συνδεσιμότητα του ποταμού καθώς και το καθεστώς ροής που επικρατεί, και πως αυτή η διαδικασία της μεταναστευτικής ροής επηρεάζεται. Ο ανθρώπινος παράγοντας δημιούργησε τεχνητά περάσματα, τις διόδους ιχθύων, ώστε να αντιμετωπίσει το θέμα αυτό. Οι διόδους ιχθύων παίζουν σημαντικό ρόλο στην προστασία των ιχθύων, αλλά ο σχεδιασμός τους είναι περίπλοκος, καθώς λαμβάνει υπόψη υδραυλικά σχεδιαστικά κριτήρια, προτιμήσεις των ιχθύων όσον αφορά την ταχύτητα τους μέσα στην δίοδο και εκτιμήσεις της θνησιμότητας των ιχθύων.

Παγκοσμίως συναντώνται νομοθετικά πλαίσια για τη σωστή διαχείριση των υδατικών πόρων (*Regulatory frameworks for water resources management; A comparative study, The World Bank, 2006*). Πιο συγκεκριμένα στην Ευρώπη, η Οδηγία Πλαίσιο για τα νερά της ΕΕ (*Οδηγία 2000/60/ΕΚ*) συνδυάζει ποιοτικούς, οικολογικούς και ποσοτικούς στόχους για την προστασία των υδάτινων οικοσυστημάτων, καθώς καθορίζει, μια σειρά από απαραίτητες ενέργειες για την αποτροπή της περαιτέρω υποβάθμισης όλων των υδάτων και την επίτευξη της 'καλής κατάστασης' όλων των υδατικών πόρων.

Μέσα στο γενικότερο αυτό πλαίσιο συμπεριλαμβάνονται και οι διόδους ιχθύων, καθώς η σωστή μελέτη και υλοποίηση τους είναι καθοριστική για την διατήρηση του πληθυσμού των μεταναστευτικών ιχθύων και άρα της γενικότερης διατήρησης του οικοσυστήματος. Έτσι, ερευνητές και μηχανικοί σε όλο τον κόσμο αφιερώνουν μεγάλες προσπάθειες όλη την διάρκεια των χρόνων που κατασκευάζονται οι διόδους ιχθύων, ώστε να επιλύσουν τα θέματα αυτά με στόχο καλύτερες προβλέψεις για αποδοτικότερη, αποτελεσματικότερη και πιο βέλτιστη υδραυλική σχεδίαση των διόδων ιχθύων.

Για την καλύτερη σχεδίαση διόδων ιχθύων απαιτείται αρχικά η κατανόηση της συμπεριφοράς των ιχθύων και γύρω από αυτή στρέφονται οι έρευνες. Βιολογικά χαρακτηριστικά των ιχθύων, τα οποία εξαρτώνται από το εκάστοτε είδος, όπως η κίνηση τους, οι προτιμήσεις, οι χρόνοι μετανάστευσης και οι ταχύτητες κολύμβησης λαμβάνονται υπόψη για τον σχεδιασμό των διόδων ιχθύων. Με άλλα λόγια, τίθενται ερωτήματα γύρω από το ποια γνωρίσματα σχετίζονται με τη συμπεριφορά και την κίνηση των ιχθύων και μέσω ποιων τρόπων μπορούν αυτά να αναλυθούν και να καθοριστούν. Τα μαθηματικά μοντέλα και οι υπολογιστικές προσομοιώσεις αποτελούν εργαλεία μέσω των οποίων μπορεί να προσεγγιστεί η συμπεριφορά των

ιχθύων, τα οποία αποδεικνύονται απαιτητικά. Για να επιτευχθεί μία σωστή προσέγγιση και μελέτη είναι απαραίτητη η γνώση του μελετώμενου είδους ιχθύος, η συμπεριφορά του κατά τη μεταναστευτική και αναπαραγωγική περίοδο, όπως επίσης και οι γνώσεις ιχθυομηχανικής, υδραυλικής ανάλυσης και υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα εργασία, μέσα από έρευνα του θεωρητικού υποβάθρου που βασίζονται τα μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης της συμπεριφοράς ιχθύων, έγινε προσπάθεια επιβεβαίωσης του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων με τις πειραματικές μετρήσεις τροχιάς ιχθύων στο πεδίο της περιοχής μελέτης. Εφαρμόστηκε αρχικά το υδροδυναμικό μοντέλο του πεδίου ροής, καθώς τα αποτελέσματα της ταχύτητας και της επιτάχυνσης του νερού που προκύπτουν αποτελούν τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου στο μοντέλο ιχθύος με βάση τα οποία παίρνονται οι αποφάσεις για την επιλογή της εκάστοτε συμπεριφοράς που θα ακολουθήσουν οι ιχθύες. Επίσης, περιγράφεται και αναλύεται η δομή και η λειτουργία του μοντέλου ιχθύος. Ακολουθεί ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του μοντέλου ώστε να καθοριστούν από ποιες εξαρτάται η συμπεριφορά των ιχθύων, καθώς και εφαρμογή του μοντέλου ιχθύων με βάση τις σημαντικότερες παραμέτρους ώστε να προσεγγιστούν οι πειραματικές τροχιές των ιχθύων. Τέλος, εξετάστηκε η καταλληλότητα της περιοχής μελέτης ως προς το μελετώμενο είδος ιχθύος του Ατλαντικού Σολομού και διερευνήθηκε η προτίμηση του ιχθύος ως προς τις συνθήκες της τυρβώδους κινητικής ενέργειας που επικρατούν στο πεδίο ροής της περιοχής μελέτης.

Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

- **Κεφάλαιο 1:** Εισαγωγή
- **Κεφάλαιο 2:** Περιλαμβάνει την βιβλιογραφική διερεύνηση των υφιστάμενων μοντέλων συμπεριφοράς ιχθύων καθώς και περιγραφή της φυσιολογίας του συστήματος αντίχενωσης και κίνησης των ιχθύων.
- **Κεφάλαιο 3:** Αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο που στηρίζεται το υδροδυναμικό μοντέλο. Παρουσίαση και ανάλυση της εφαρμογής και βαθμονόμησης του υδροδυναμικού μοντέλου στην περιοχή μελέτης, καθώς και ανάλυση των χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης.
- **Κεφάλαιο 4:** Παρουσίαση της δομής του μοντέλου ιχθύος, των πειραματικών τροχιών των ιχθύων στο πεδίο και τους δείκτες καταλληλότητας της περιοχής μελέτης για το συγκεκριμένο είδος ιχθύων.
- **Κεφάλαιο 5:** Περιγραφή και ανάλυση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής του μοντέλου ιχθύος.
- **Κεφάλαιο 6:** Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΙΧΘΥΩΝ

2.1. Γενικά

Η μελέτη της συμπεριφοράς και της κίνησης των ιχθύων, ώστε να γίνουν περαιτέρω κατανοητές, απαιτεί έναν συνδυασμό υποβάθρων από τα γνωστικά πεδία της Ιχθυολογίας, της Υπολογιστικής Υδροδυναμικής Ροής και της επιστήμης των Υπολογιστών. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η φυσιολογία των ιχθύων, οι συμπεριφορές που ακολουθούν, ενώ παρουσιάζονται ενδεικτικά και κάποια υφιστάμενα μαθηματικά μοντέλα κίνησης και συμπεριφοράς ιχθύων.

2.2. Μεταναστευτικά είδη ιχθύων

Η μετανάστευση των ιχθύων αποτελεί περίπλοκη διαδικασία και για αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπόψη για την αποτελεσματική προσομοίωση της κίνησης τους. Η κατηγορία που εμπίπτουν οι μελετώμενοι ιχθύες είναι η μετανάστευση για αναπαραγωγικούς σκοπούς. Υπάρχουν τρεις μεγάλες κατηγορίες αναπαραγωγικής μετανάστευσης: *Οκεανόδρομες*, *Διάδρομες* και *Ποταμόδρομες* μεταναστεύσεις (Μεγαλοφώνου, 2015).

Στην κατηγορία της Διάδρομης μετανάστευσης, δηλαδή μεταξύ της θάλασσας και του γλυκού νερού, υπάρχουν τριών ειδών ταξινομήσεις της μετανάστευσης των ιχθύων στον κύκλο της ζωής τους :

- **Ανάδρομα μεταναστευτικά είδη:** ενήλικοι ιχθύες μεταναστεύουν από τον ωκεανό για να αναπαραχθούν στο γλυκό νερό. Η κατανάλωση τροφής και η ανάπτυξη των ενήλικων ιχθύων λαμβάνει χώρα στην θάλασσα ενώ η αναπαραγωγή στο γλυκό νερό. Αφού εκκολαφθούν οι νεαροί ιχθύες παραμένουν στο ποτάμι για έναν χρόνο έως ότου γίνουν ενήλικες όπου και ξεκινούν την καθοδική τους πορεία προς τον ωκεανό (π.χ. Ατλαντικός Σολωμός και Καφέ Πέστροφα).
- **Κατάδρομα μεταναστευτικά είδη:** ακολουθούν ακριβώς το αντίθετο μεταναστευτικό μοτίβο, καθώς οι ενήλικοι ιχθύες μεγαλώνουν και αναπτύσσονται στο γλυκό νερό και ταξιδεύουν προς τον ωκεανό για την αναπαραγωγή τους (π.χ. Χέλι).
- **Αμφίδρομα μεταναστευτικά είδη:** οι προνύμφες εκκολάπτονται σε γλυκά νερά και επιστρέφουν γρήγορα στο θαλασσινό νερό για να αναπτυχθούν. Τότε οι νεαροί ιχθύες επιστρέφουν στο γλυκό νερό για να αναπτυχθούν και αναπαραχθούν. Αυτή η περίπτωση είναι σπάνια και πρακτικά δεν εξυπηρετεί τους αναπαραγωγικούς σκοπούς. (Tyus, 2011)



Εικόνα 2.2-1: Ατλαντικός Σολομός (*Salmo salar*) [πηγή: NOAA Fisheries-National Oceanic and Atmospheric Administration, <https://www.fisheries.noaa.gov/species/atlantic-salmon-protected>]

Στην παρούσα εργασία, έγινε προσπάθεια προσομοίωσης της κατάντη μετανάστευσης ανάδρομου ιχθύος και συγκεκριμένα του Ατλαντικού Σολομού, ενώ το χαρακτηριστικό του οποίου λαμβάνεται υπόψη στο μοντέλο είναι το μήκος του. Το στάδιο ηλικίας που μελετάται ο Σολομός στο παρών μοντέλο είναι το νεαρό στάδιο πριν την ενηλικίωση κατά το οποίο ο Σολομός ξεκινάει τη μεταναστευτική του πορεία και το στάδιο αυτό ονομάζεται smolt. Η διαδικασία κατά την οποία ο Σολομός γίνεται από μικρός, δηλαδή parr, σε smolt λέγεται smoltification. Ο Σολομός αποκτά ασημί όψη εξωτερικά, ενώ ταυτόχρονα περνάει διάφορες αλλαγές στην φυσιολογία του ώστε να μπορέσει να κάνει τη μετάβαση από το γλυκό νερό στο θαλασσινό. Η κατάντη μετανάστευση στο ποτάμι είναι κυρίως νυκτερινή και συνήθως ενεργοποιείται από αυξήσεις στη ροή του νερού. Πραγματοποιείται στο χρονικό διάστημα μεταξύ Απριλίου και Ιουνίου (Hendry et al. 2003). Περίπου στα 2 με 3 χρόνια της ζωής τους οι Σολομοί φτάνουν το στάδιο που είναι έτοιμοι να μεταναστεύσουν στην θάλασσα (*Nonindigenous aquatic species, USGS*).

2.3. Μέθοδοι ανίχνευσης των ιχθύων

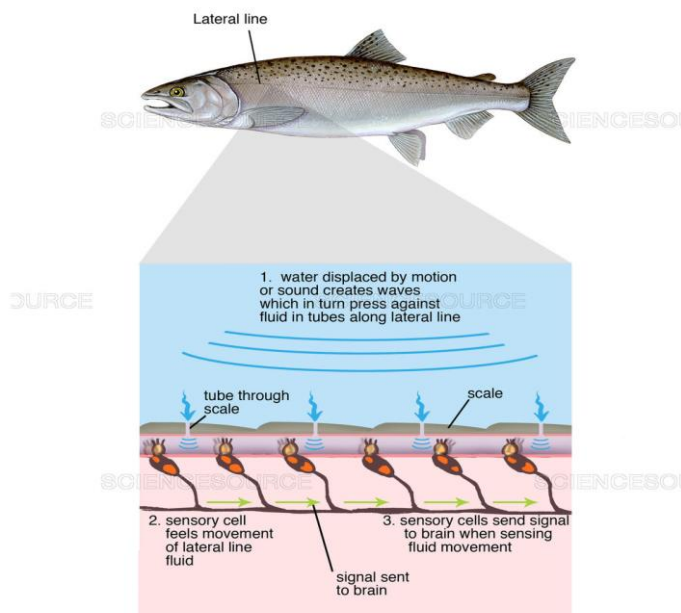
2.3.1 Αισθητήρια όργανα ανίχνευσης

Τα ψάρια μπορούν να πλέουν στον χώρο με τη βοήθεια διάφορων αισθητήριων οργάνων τα οποία τους παρέχουν πληροφορίες για το περιβάλλον, καθώς και να αλληλοεπιδρούν με βιολογικά, φυσικά και χημικά συστατικά. Κάποιες από αυτές τις αισθήσεις είναι η ακοή, η όραση, η χημοαισθητηριακή αντίληψη, η μηχανική αντίληψη, η ηλεκτρική αντίληψη και ο μαγνητικός προσανατολισμός. Πιο συγκεκριμένα, στη μηχανική αντίληψη περιλαμβάνεται το πλευρικό σύστημα με τη βοήθεια του οποίου οι ιχθύες αντιλαμβάνονται διαφορές στην πίεση του νερού και τις δονήσεις (Tyus, 2011).

2.3.2 Το πλευρικό σύστημα (*lateral line system*)

Η μικρότερη λειτουργική μονάδα του πλευρικού συστήματος είναι ο νευρομαστός, αισθητήρας που βρίσκεται επάνω στην επιφάνεια του δέρματος του ιχθύ ή κάτω από την επιφάνεια του μέσα σε κανάλια με υγρό. Οι νευρομαστοί αποτελούνται από αισθητήρια τριχοειδή κύτταρα που διαχωρίζουν το νευρομαστό από τον περιβάλλοντα ιστό (Bleckmann, 2007). Τα τριχοειδή κύτταρα αντιδρούν στις υδροδυναμικές διαφορές του περιβάλλοντος πεδίου ροής και παρέχουν

πληροφορίες για την θέση του ιχθύ στον χώρο και σε σχέση με τις άλλες οντότητες γύρω του. Το πλευρικό σύστημα θεωρείται ότι δημιουργεί υδροδυναμικές εικόνες των κινούμενων και στατικών αντικειμένων του περιβάλλοντος, παρόμοιες με τις εικόνες που δημιουργούνται από το σύστημα όρασης (Coombs and Van Netten, 2006).



Εικόνα 1.3-1: Το πλευρικό σύστημα [πηγή: www.sciencesource.com].

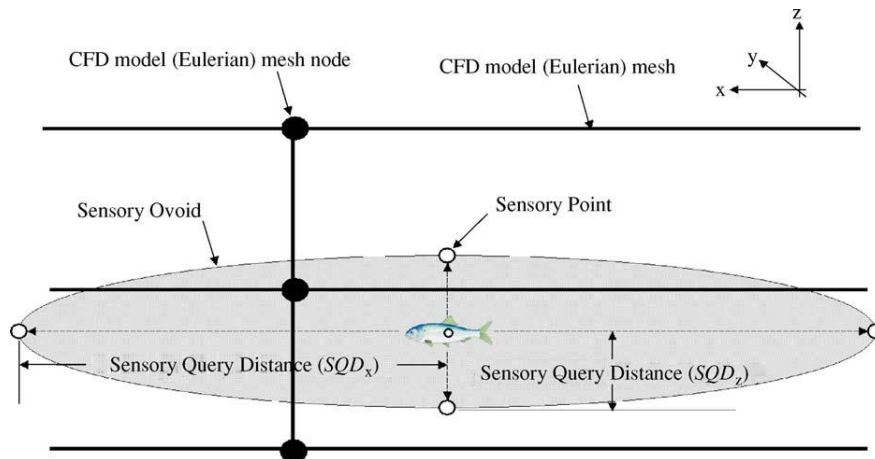
2.3.3. Η περιοχή αντίληψης (sensory ovoid)

Οι ιχθύες δέχονται σήματα και πληροφορίες από το περιβάλλον με τη βοήθεια του πλευρικού συστήματος, που αναφέρθηκε παραπάνω, μέσα σε έναν όγκο που τους περιβάλλει. Η κίνηση του ιχθύ αντιμετωπίζεται ως διαδικασία δύο βημάτων: πρώτα ο ιχθύς αξιολογεί τους παράγοντες μέσα στην περιοχή αντίληψής του και δευτερευόντως εκτελεί μία αντίδραση με βάση τον παράγοντα με τη μορφή κίνησης (Brian, 2003). Η περιοχή αυτή μπορεί να προσομοιωθεί ως συμμετρική σφαίρα ή ως ελλειψοειδής (Goodwin et al., 2006). Η κλίμακα της περιοχής αντίληψης αντιπροσωπεύει το εύρος αντίληψης του πλευρικού συστήματος του ιχθύος. Οι διαστάσεις του όγκου της περιοχής αντίληψης εξαρτώνται από το πλευρικό σύστημα ή το μήκος του ιχθύος και συνήθως το μήκος των διαστάσεων θεωρείται ότι ισούται μία με δύο φορές το μήκος του σώματος του ιχθύος (Coombs, 1999).

Οι παράλληλες, κάθετες και κατακόρυφες (x , y , z) αποστάσεις των αισθητήριων σημείων από το κέντρο του ιχθύος ως προς τον άξονά του (Sensory Query Distances) περιγράφονται από το μοντέλο των Goodwin et al., 2006 ως εξής:

$$SQD = \Delta t * S_f * D_a \quad (2.3-1)$$

Όπου Δt το χρονικό βήμα, S_f το μήκος του σώματος του ιχθύος και D_a το πλήθος των μηκών σώματος του ιχθύος (ισούται με δύο μήκη σώματος ιχθύος).



Εικόνα 2.3-2: Δισδιάστατη άποψη επιμηκών και κατακόρυφων αποστάσεων της προσομοιωμένης περιοχής αντίληψης του ιχθύος [πηγή: Goodwin et al., 2006]

2.4. Κίνηση, συμπεριφορά και ταχύτητα ιχθύων

2.4.1. Κίνηση ιχθύων

Οι ιχθύες, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, έλκονται ή απωθούνται από μια ποικιλία εξωτερικών περιβαλλοντικών προτροπών, όπως επίσης και από εσωτερικά σήματα. Η πιο απλή και προβλέψιμη απόκριση σε ερέθισμα είναι η κίνηση, η οποία δεν εκτελείται τυχαία όπως παλαιότερα θεωρούσε η επιστημονική κοινότητα. Η κατευθυνόμενη, λοιπόν, μη τυχαία, αντανακλαστική κίνηση ως απόκριση σε κάποιο ερέθισμα λέγεται Τακτισμός (*Taxis*). Οι κινήσεις αυτές μπορεί να είναι θετικές ή αρνητικές σε σχέση με το ερέθισμα που τις προκαλεί. Αυτές είναι:

- Φωτοτακτισμός: ο προσανατολισμός σε σχέση με το φως.
- Γεωτακτισμός: η κατευθυνόμενη κίνηση, ανταποκρινόμενη στο ερέθισμα της βαρύτητας.
- Ηλεκτροτακτισμός: εντοπισμός εκπομπής ηλεκτρικών σημάτων, μέσο προσανατολισμού και επικοινωνίας.
- Μαγνητοτακτισμός: προσανατολισμός με βάση μαγνητικά πεδία.
- Θιγμοτακτισμός: προσανατολισμός με βάση την επαφή με κάποιο αντικείμενο.
- Ρεοτακτισμός: προσανατολισμός κίνησης σε σχέση με τη ροή του ύδατος.
- Χημειοτακτισμός: αποφυγή εχθρών, εύρεση τροφής, αναπαραγωγή (*Μεγαλοφώνου, 2015*).

Οι τάξεις που βασίστηκε η προσομοίωση είναι ο Θιγμοτακτισμός και ο Ρεοτακτισμός ως μη τυχαίες κινήσεις συμπεριφοράς. Ο Θιγμοτακτισμός αποτελεί βασικό στοιχείο ως συμπεριφορά αποφυγής εμποδίων, καθώς έχει υπάρξει αριθμός μοντέλων που ενσωματώνουν αντιδράσεις βασισμένες στις κατασκευές ως εμπόδια (*Haefner and Bowen, 2002, Lemmasson et al., 2008*).

Όσον αφορά τον Ρεοτακτισμό, υπάρχει ο θετικός και αρνητικός. Ο θετικός Ρεοτακτισμός αναφέρεται στον ανάντη προσανατολισμό του ιχθύος και κολύμβηση αντίθετα στη ροή, ενώ ο αρνητικός Ρεοτακτισμός αναφέρεται στον κατάντη προσανατολισμό και κολύμβηση με τη ροή. Τα μοντέλα που προσομοιώνουν την κατάντη μετανάστευση υποθέτουν αρνητικό Ρεοτακτισμό ως βασική συμπεριφορά

και ο προσανατολισμός του ιχθύος υπολογίζεται σε σχέση με την κατεύθυνση της ροής (Goodwin et al. 2014, Arenas et al., 2015).

2.4.2. Ταχύτητα ιχθύων

Όσον αφορά τις ταχύτητες κολύμβησης υπάρχουν 3 κατηγορίες που συνδέονται με τη συμπεριφορά των ιχθύων:

- Η συνεχής κολύμβηση ή ταχύτητα πλεύσης που διατηρείται περισσότερο και είναι χαμηλή.
- Η παρατεταμένη ή σταθερή κολύμβηση που διαρκεί σε χρόνο μεταξύ συνεχούς και εκρηκτικής κολύμβησης.
- Η εκρηκτική κολύμβηση που διαρκεί λίγα δευτερόλεπτα (Webb, 1975).

Στην συνεχή κολύμβηση οι ιχθύες διατηρούν χαμηλή ταχύτητα για την πλεύση μέσα στο νερό ώστε να αποφύγουν την κόπωση. Η συνεχής κολύμβηση στην κατάντη μετανάστευση επιτρέπει στους ιχθύες να κολυμπούν στην κατάντη κατεύθυνση δηλαδή με αρνητική ρηόταξη ή ανάντη με θετική ρηόταξη.

Η παρατεταμένη κολύμβηση χρησιμοποιείται κυρίως ως μηχανισμός αντίδρασης για την αποφυγή εμποδίων κατά την οποία οι ιχθύες βιώνουν κόπωση (Katopodis, 2005). Οι ιχθύες χρησιμοποιούν την εκρηκτική κολύμβηση για να αποφύγουν άμεσο κίνδυνο είτε μία σύγκρουση με εμπόδιο ή μετά από εντοπισμό θηρευτή. Έτσι η εκρηκτική κολύμβηση συνδέεται με την θιγμότητα ή την βιόταξη.

2.4.3. Συμπεριφορά ιχθύων

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην προσπάθεια προσομοίωσης συμπεριφοράς ιχθύων λόγω υδροδυναμικών ερεθισμάτων. Τέτοιες συμπεριφορές μπορούν να περιγραφούν από τους τακτισμούς της Θιγμότητας, της Ρηόταξης και της Γεώταξης. Στην πρόσφατη βιβλιογραφία έχουν καθοριστεί μια σειρά συμπεριφορών, από τις οποίες οι πιο σημαντικές παρουσιάζονται παρακάτω.

Οι Haefner and Bowen, (2002) εξέτασαν τη συμπεριφορά των ιχθύων μέσω μιας εγκατάστασης συλλεκτήρα με τη μορφή περσίδων στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ και ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο που επιλύει εξισώσεις κίνησης ιχθύων σύμφωνα με φυσικές δυνάμεις στο πεδίο ροής και απλούς τρόπους αποφυγής κινδύνων, στην περίπτωση εδώ τα εμπόδια εδώ είναι οι περσίδες. Καθορίστηκαν τέσσερις αντιδράσεις συμπεριφοράς που ενεργοποιούνται ανάλογα με την απόσταση που βρίσκεται ο 'κίνδυνος' για τα ψάρια:

1. Δεν εντοπίζεται 'κίνδυνος' οπότε διατηρείται η συνεχής ταχύτητα.
2. Ο 'κίνδυνος' εντοπίζεται σε απόσταση 1 φορά του μήκους του σώματος του ιχθύος, οπότε και ενεργοποιείται η παρατεταμένη κολύμβηση.
3. Ο 'κίνδυνος' εντοπίζεται σε απόσταση 0.5 φορές του μήκους του σώματος του ιχθύος, οπότε και ενεργοποιείται η εκρηκτική κολύμβηση.
4. Δεν υπάρχει κίνδυνος μετά την εκρηκτική κολύμβηση και ενεργοποιείται η αντίστροφη κολύμβηση.

Οι Goodwin et al. (2006) εξέτασαν τα συστήματα για την κατάντη μετανάστευση ιχθύων σε τρία υδροηλεκτρικά φράγματα στις ΗΠΑ. Ανέπτυξαν ένα μαθηματικό

μοντέλο και το εφάρμοσαν ώστε να προσομοιώσουν τρισδιάστατα μοτίβα κίνησης της κατάντη μετανάστευσης Σολομών. Από τους Goodwin et al. (2006) έχουν καθοριστεί τέσσερις συμπεριφορές που ενεργοποιούνται με βάση την ταχύτητα του νερού, την κλίση πίεσης και την υδραυλική τάση:

1. B1: Ενεργή κολύμβηση με την ίδια την κατεύθυνση του διανύσματος της ροής. Αποτελείται από την κολύμβηση στην κατεύθυνση της ροής σε συνδυασμό με έναν τυχαίο περίπατο με παράγοντα τυχειότητας (biased correlated random walk, BCRW).
2. B2: Κολύμβηση προς τις υψηλότερες ταχύτητες ροής ώστε να μειώσει την υδραυλική τάση. Κολύμβηση προς τις υψηλότερες ταχύτητες ροής, εξασφαλίζοντας μείωση των εναλλαγών στις δυνάμεις που του ασκούνται, διευκόλυνση της κατάντη μετανάστευσης μέσω της αποφυγής εμποδίων και τον περιορισμό έκθεσης στην τύρβη.
3. B3: Κολύμβηση αντίθετα στην κατεύθυνση της ροής σε περιοχές με χαμηλότερες ταχύτητες ροής, όπου συνιστά μια αντίδραση διαφυγής κατά την οποία το ψάρι εγκαταλείπει προσωρινά την κατάντη μετανάστευση και στρέφεται προς τα ανάντη.
4. B4: Κολύμβηση προς το βάθος που έχει εγκλιματιστεί. Κατευθύνει το ψάρι προς το βάθος στο οποίο έχει προγενέστερα εγκλιματιστεί, εάν δεν έχει ήδη επιτευχθεί από τις άλλες συμπεριφορές.

Οι συμπεριφορές B2 και B3 σχετίζονται με αλλαγές στις επιταχύνσεις, ενώ η συμπεριφορά B4 με αλλαγές στην πίεση αναφορικά με το βάθος του νερού.

Οι Lemasson et al. (2008) επέκτειναν την έρευνα των Haefner and Bowen (2002) και χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που προέκυψαν από το μικρής κλίμακας φυσικό μοντέλο εισήγαγαν κυρίως στοχαστικότητα στο μοντέλο και πρότειναν τέσσερις κανόνες συμπεριφοράς ιχθύων:

1. Όταν ο ιχθύς μεταβάλλει την κίνηση του ώστε να αποφύγει τον 'κίνδυνο, ο επιθυμητός του προσανατολισμός λαμβάνεται από μια συνεχή κατανομή, με ακρότατα τις γωνίες που του επιτρέπουν να απομακρύνεται από τα τοιχώματα ή τις περσίδες της κατασκευής.
2. Οι ιχθύες εντοπίζουν τον 'κίνδυνο' σε απόσταση 1.5 φορές του μήκους του σώματος του ιχθύ και χρησιμοποιούν την παρατεταμένη κολύμβηση.
3. Οι ιχθύες δεν αντιλαμβάνονται τους τοίχους του καναλιού ως κίνδυνο αλλά τους βλέπουν ουδέτερα. Έτσι ενεργοποιείται συμπεριφορά ευθύγραμμής κίνησης, σε αντίθεση με τις περσίδες που θεωρούνται 'κίνδυνος' και ενεργοποιείται η συμπεριφορά αποφυγής.
4. Κατά την κίνηση τους, οι ιχθύες περνούν από απρόβλεπτες αλλαγές στην ταχύτητα και στον προσανατολισμό τους, τα οποία λαμβάνονται από στατιστικές κατανομές πειραματικών δεδομένων (κατανομή γάμμα για την ταχύτητα και κανονική κατανομή για τον προσανατολισμό).

Οι Vowles et al. (2014) εξέτασαν τη συμπεριφορά της κατάντη μετανάστευσης Σολομών σε πειραματικό αγωγό νερού, ανάντη ενός τετραγωνικού υπερχειλιστή, κατά την επιτάχυνση της ροής και σε συνθήκες του σκοταδιού και φωτός, ώστε να απωθήσουν τους ιχθύες από επικίνδυνες περιοχές, όπως οι τουρμπίνες, και καθόρισαν πέντε τύπους συμπεριφορών:

1. Ενεργή κολύμβηση με τη ροή προς την κατάντη κατεύθυνση.
2. Παθητική συμπαράσυρση με τη ροή προς την κατάντη κατεύθυνση.
3. Αντίδραση, αλλαγή προσανατολισμού κοιτώντας προς τα ανάντη και συνέχεια κίνησης προς την κατάντη κατεύθυνση.
4. Απόρριψη κίνησης κατάντη και παραμονή σε περιοχές με υψηλότερες ταχύτητες.
5. Υποχώρηση και αποφυγή στα ανάντη με κολύμβηση αντίθετα στη ροή με ταχύτητα υψηλότερη σε σχέση με την ταχύτητα του νερού.

2.5. Παρουσίαση υφιστάμενων μοντέλων συμπεριφοράς ιχθύων

Στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορα μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν τη συμπεριφορά των ιχθύων. Μία βιβλιογραφική διερεύνηση των υφιστάμενων μοντέλων έχει υποδείξει ότι τα μοντέλα που ακολουθούν αποτελούν τα πιο εξεζητημένα, επισημαίνοντας τα κύρια χαρακτηριστικά τους και τη λειτουργία τους (Γιαννούλης Σ., 2015). Το μοντέλο που εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία βασίστηκε κυρίως στις αρχές του μοντέλου από τους Goodwin et al. (2014), το οποίο παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω.

2.5.1. Haefner and Bowen, 2002; Lemasson et al., 2008

Οι κύριες πτυχές του μοντέλου Haefner and Bowen είναι οι εξής:

1. Το μοντέλο αντιλαμβάνεται τον ιχθύ ως δισδιάστατο.
2. Ο ιχθύς κινείται μέσω του πεδίου ροής σύμφωνα με τις Νευτώνειες δυνάμεις
3. Ο ιχθύς αποφεύγει τα εμπόδια με χρήση βασικού ενστίκτου επιβίωσης
4. Η συμπεριφορά και η φυσιολογία του ιχθύ καθορίζει τις αντιδράσεις του στα εμπόδια
5. Η νέα θέση του ιχθύ υπολογίζεται από τις εξισώσεις κίνησης επιλύοντας πέντε συνήθεις διαφορικές εξισώσεις χρησιμοποιώντας την τέταρτης τάξης Runge-Kutta μέθοδο.

Οι εξισώσεις κίνησης που επιλύονται είναι:

$$\frac{du_{fx}}{dt} = 0.5 * \rho * S_a * U_x^2 * \frac{(C_f + C_p)}{m_v} + \frac{P_x}{m_v} \quad (2.5-1)$$

$$\frac{du_{fy}}{dt} = 0.5 * \rho * S_a * U_y^2 * \frac{(C_f + C_p)}{m_v} + \frac{P_y}{m_v} \quad (2.5-2)$$

$$\frac{dx_f}{dt} = u_{fx} \quad (2.5-3)$$

$$\frac{dy_f}{dt} = u_{fy} \quad (2.5-4)$$

$$\frac{dO}{dt} = -f(M) \quad (2.5-5)$$

Όπου ισχύει $U = u_w - u_f$, ενώ u_f είναι η σχετική ταχύτητα του ιχθύος σε σχέση με την ταχύτητα του πεδίου ροής u_w , M είναι η κατηγορία κολύμβησης με βάση τις τέσσερις συμπεριφορές, C_f, C_p είναι οι συντελεστές οπισθέλκουσας, $\frac{dO}{dt}$ ο ρυθμός εξάντλησης του οξυγόνου ή η ενέργεια που χρειάζεται για κάθε κατηγορία κολύμβησης και P η ώθηση κολύμβησης ανάλογα με την κατεύθυνση θ της κίνησης του ιχθύος:

$$P_x = P * \cos(\theta) \quad (2.5-6)$$

$$P_y = P * \sin(\theta) \quad (2.5-7)$$

Η ώθηση κολύμβησης P υπολογίζεται ως εξής:

$$P = \begin{cases} 0.5C_f S_a \rho u_f^2 & (2.5 - 8) \\ S_p 0.5C_f S_a \rho u_f^2 & (2.5 - 9) \\ \left(1.0 - \frac{1.0}{1.0 + |U_x|}\right) \frac{O}{O_{max}} S_b A_R m_v & (2.5 - 10) \\ \frac{O}{O_{max}} S_b A_B m_v & (2.5 - 11) \end{cases}$$

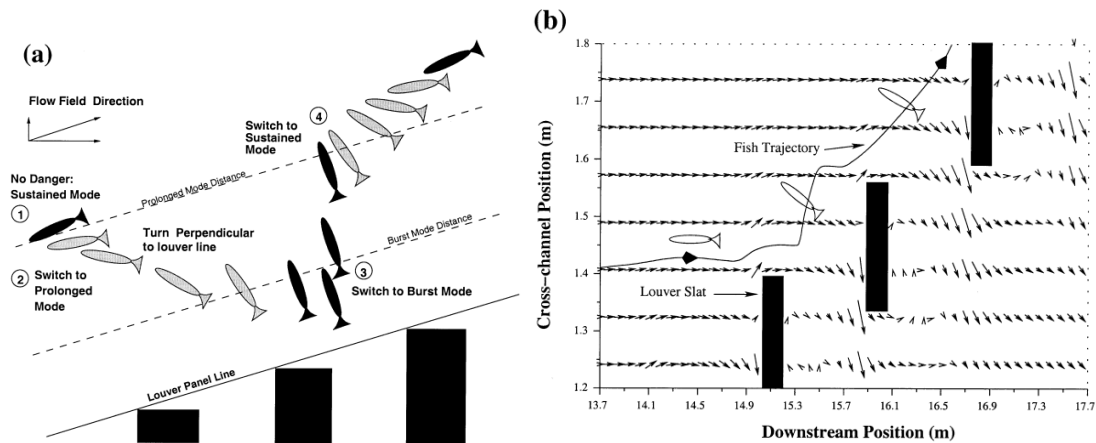
Όπου C_f ο συντελεστής οπισθέλκουσας για την επιφανειακή τριβή, S_a η βρεχόμενη επιφάνεια του ιχθύος, ρ η πυκνότητα του νερού, u_f η ταχύτητα κολύμβησης του ιχθύος, $U_x = u_w - u_f$, A επιτάχυνση για κάθε κατηγορία κολύμβησης, m_v η εικονική μάζα του ιχθύος, S οι παράγοντες που εξαρτώνται από το κάθε είδος ιχθύος και O ο χρόνος που απομένει για τις κατηγορίες κολύμβησης σε σχέση με την κατανάλωση του οξυγόνου.

Ανάλογα με τη συμπεριφορά που επιλέγεται από τον ιχθύ, υπάρχει μια διαφορετική κατανάλωση οξυγόνου που σχετίζεται με τον χρόνο που απομένει για κάθε κατηγορία κολύμβησης, όπου υπολογίζεται ως εξής:

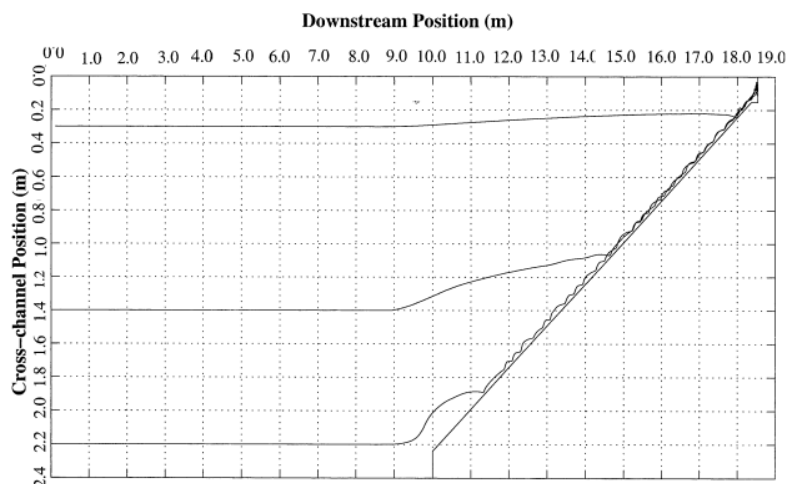
$$\frac{dO}{dt} = \begin{cases} 0.0 & (2.5 - 12) \\ -0.01f & (2.5 - 13) \\ -0.02f & (2.5 - 14) \\ -f & (2.5 - 15) \end{cases}$$

Όπου O έχει μονάδες χρόνου (sec), με $O = 6 \text{ sec}$ για κάθε ιχθύ στην αρχή της προσομοίωσης και f ισούται με 1.0 ονομαστικά.

Στις εικόνες φαίνονται οι συμπεριφορές των ιχθύων κοντά στις περσίδες, καθώς και ενδεικτικές τροχιές ιχθύων από την προσομοίωση.



Εικόνα 2.5-1: (α) Συμπεριφορές ιχθύων κοντά στις περσίδες, (β) προσομοιωμένες τροχιές ιχθύων και πεδίο ροής κοντά στις περσίδες [πηγή: Haefner and Bowen, 2002]



Εικόνα 2.5-2: Προσομοιωμένες τροχιές ιχθύων για διαφορετικές αρχικές θέσεις διατομών (0.3, 1.4, 2.2μ). Η ευθεία διαγώνια γραμμή είναι οι περιόδους [πηγή: Haefner and Bowen, 2002]

Οι Lemasson et al. (2008) τροποποίησαν το μοντέλο των Haefner and Bowen (2002) ως εξής:

- Προστέθηκαν οι συμπεριφορές που περιγράφονται παραπάνω.
- Χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά μια εμπειρική σχέση μεταξύ του ρυθμού κατανάλωσης του οξυγόνου και της ταχύτητας κολύμβησης.

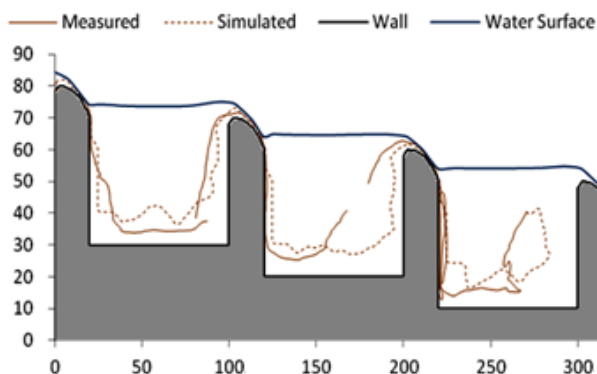
2.5.2. Abdelaziz S., 2013

Ο Abdelaziz S. μελέτησε την κίνηση των ιχθύων μέσα σε δίοδο και συγκεκριμένα σε δεξαμενές υπερχειλίσης. Με βάση τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου αναπτύχθηκε ένα αριθμητικό μοντέλο συνδυάζοντας τη έννοια της χαμηλής ενέργειας και της τυχαίας κίνησης κατά την οποία τα αποτελέσματα της τύρβης και της μνήμης των ιχθύων λαμβάνονται υπόψη. Το μοντέλο επιβεβαιώνεται με τα πειραματικά δεδομένα ροής και κίνησης ιχθύων από προηγούμενη μελέτη.

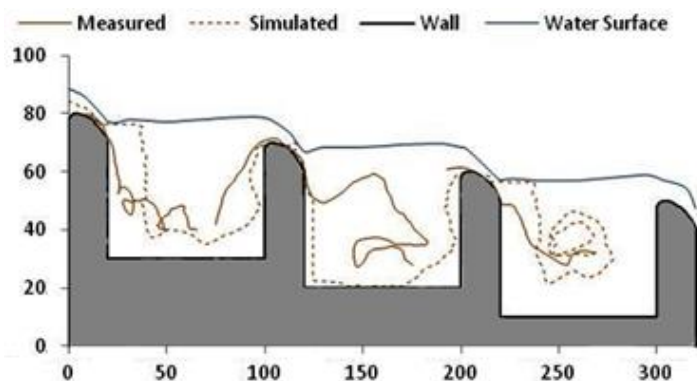
Τα χαρακτηριστικά του μοντέλου είναι:

1. Επιλύονται οι τρισδιάστατες εξισώσεις Navier-Stokes και η εξίσωση συνέχειας για ασυμπίεστα υγρά μέσω του προγράμματος FLOW-3D.
2. Η κίνηση των προσομοιωμένων ιχθύων καταγράφεται χρησιμοποιώντας την ελάχιστη δαπάνη ενέργειας μαζί με μία μέθοδο τυχαίου περιπάτου.
3. Ο ιχθύς αναγνωρίζει την κατεύθυνση την ανάντη ροής μέσα στη δίοδο με το να κινείται αντίθετα στην ροή του νερού που έρχεται από ψηλά.
4. Αν εντοπίζεται άνοιγμα στην ανάντη κατεύθυνση σε απόσταση γύρω από τον ιχθύ τότε ο ιχθύς θα περάσει από εκεί. Διαφορετικά ελέγχει τη μέγιστη ταχύτητα γύρω από τον ιχθύ. Αν έχει τιμή μεγαλύτερη από μία προκαθορισμένη τότε ενεργοποιείται η τυχαία κίνηση, αλλιώς αν η τιμή είναι αρκετά υψηλή ώστε να αναγνωρίσει την ανάντη κατεύθυνση τότε ο ιχθύς θα προχωρήσει αντίθετα σε αυτήν. Τότε εφαρμόζεται το μοντέλο χαμηλής ενέργειας και τύρβης.
5. Ανάλογα με την ύπαρξη τύρβης λόγω κλίσης ταχυτήτων, αν η κλίση ταχυτήτων είναι μικρότερη από την κρίσιμη τιμή της κλίσης ταχυτήτων τότε ο ιχθύς περνά χωρίς να λάβει υπόψη του το αποτέλεσμα της αποφυγής της τύρβης. Αντίθετα, αν είναι μεγαλύτερη τότε ενεργοποιείται το μοντέλο αποφυγής της τύρβης.

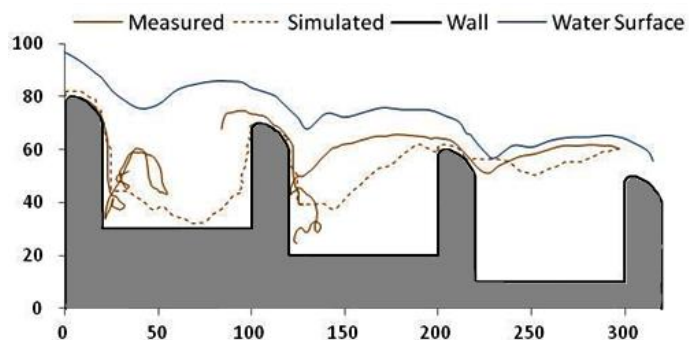
Έγιναν τρεις δοκιμές στο μοντέλο με διαφορετικές και αυξανόμενες τιμές παροχών ώστε να μελετηθεί η επίδραση των διαφορών του υδροδυναμικού πεδίου στη συμπεριφορά των ιχθύων.



Εικόνα 2.5-3: Προσομοιωμένη και πειραματική κίνηση ιχθύος μέσα στη δίοδο. Με την διακεκομμένη γραμμή είναι η προσομοιωμένη και με την συνεχόμενη πορτοκαλί είναι η πειραματική κίνηση-περίπτωση 1 [πηγή: Abdelaziz et al. 2013].



Εικόνα 2.5-4: Προσομοιωμένη και πειραματική κίνηση ιχθύος μέσα στη δίοδο. Με την διακεκομμένη γραμμή είναι η προσομοιωμένη και με την συνεχόμενη πορτοκαλί είναι η πειραματική κίνηση-περίπτωση 2 [πηγή: Abdelaziz et al. 2013].



Εικόνα 2.5-5: Προσομοιωμένη και πειραματική κίνηση ιχθύος μέσα στη δίοδο. Με την διακεκομμένη γραμμή είναι η προσομοιωμένη και με την συνεχόμενη πορτοκαλί είναι η πειραματική κίνηση-περίπτωση 3 [πηγή: Abdelaziz et al. 2013].

2.5.3. Goodwin et al., 2006, 2014

Οι Goodwin et al. παρουσίασαν δύο εκδόσεις του μοντέλου μέσα στην δεκαετία. Τα κύρια χαρακτηριστικά των δύο εκδόσεων είναι:

1. Μοντέλα υπολογιστικής υδροδυναμικής που επιλύουν τις κατά Reynolds ολοκληρωμένες εξισώσεις Navier-Stokes χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών της ροής τα οποία αποτελούν δεδομένα εισόδου στο μοντέλο.
2. Τα υπολογιστικά πλέγματα της τοπολογίας που χρησιμοποιούνται είναι ορθογωνικά και δομημένα.
3. Οι ιχθύες αξιολογούν τα υδροδυναμικά ερεθίσματα μέσα στην περιοχή αντίληψης ώστε να καθορίσουν τη συμπεριφορά τους.
4. Όταν αποφασίζεται μία συμπεριφορά, υπολογίζεται το αντίστοιχο διάνυσμα της ταχύτητας κολύμβησης (u_f, v_f, w_f) καθώς και την κατεύθυνση για την επιλεγμένη συμπεριφορά, ενώ υπολογίζεται και η καινούρια θέση του ιχθύος λαμβάνοντας υπόψη την προηγούμενη θέση.

Με βάση την 'μόλις αισθητή διαφορά' του Weber, κάθε συμπεριφορά ενεργοποιείται αναγνωρίζοντας την υπέρβαση ενός κατώφλιου μεταξύ του σχετικού ερεθίσματος και της ήδη εγκλιματισμένης έντασης και δίνεται ως εξής:

$$E_t = \frac{I^t - I_a^t}{I_a^t} > k_i \quad (2.5-16)$$

Όπου I^t είναι η ένταση του αντίστοιχου ερεθίσματος στην θέση που βρίσκεται ο ιχθύς την χρονική στιγμή t , I_a^t η τιμή της έντασης που ο ιχθύς έχει εγκλιματιστεί και k_i η οριακή τιμή, το κατώφλι κάθε συμπεριφοράς.

Ύστερα από την απόφαση ενεργοποίησης μίας συμπεριφοράς, χρησιμοποιείται μία πιθανοτική προσέγγιση ώστε να προσομοιωθεί πως ο ιχθύς αλλάζει από τη μία συμπεριφορά στην άλλη. Υπολογίζεται η αναμενόμενη χρησιμότητα U^t από την πιθανότητα P^t να αποκτηθεί η χρησιμότητα u_i αντίστοιχη για κάθε συμπεριφορά. Η υιοθετημένη συμπεριφορά θα είναι τελικά αυτή που παρέχει τη μέγιστη αναμενόμενη χρησιμότητα U^t :

$$U_i^t = P_i^t * u_i - C_i^t \quad (2.5-17)$$

Όπου u_i είναι η εσωτερική χρησιμότητα για κάθε συμπεριφορά, P_i^t η πιθανότητα για την χρησιμότητα της κάθε συμπεριφοράς και C_i^t το κόστος ενέργειας που απαιτείται για την εκτέλεση μίας συμπεριφοράς.

Μετά τον προσδιορισμό του διανύσματος της ταχύτητας κολύμβησης (u_f, v_f, w_f), η νέα θέση του ιχθύ υπολογίζεται ως εξής:

$$x^{t+dt} = x^t + (u + u_f) * \Delta t \quad (2.5-18)$$

$$y^{t+dt} = y^t + (v + v_f) * \Delta t \quad (2.5-19)$$

$$z^{t+dt} = z^t + (w + w_f) * \Delta t \quad (2.5-20)$$

Όπου (x, y, z) τα διανύσματα θέσης και (u, v, w) τα διανύσματα της ταχύτητας ροής. Οι Goodwin et al. (2006) θεώρησαν την υδραυλική τάση ως ερέθισμα για την απόφαση συμπεριφοράς. Έτσι, αφού η I^t εξαρτάται από τον λογάριθμο της υδραυλικής τάσης σε κλίμακα ως προς μία τιμή αναφοράς θα ισχύει ότι:

$$I^t = \log \frac{S^t}{S_0} \quad (2.5-21)$$

Όπου $S^t = \int \left| \frac{\partial u_i}{\partial u_j} \right|$ η υδραυλική τάση και S_0 η τιμή αναφοράς.

Οι Goodwin et al. (2014) χρησιμοποίησαν το μέγεθος της επιτάχυνσης της ροής A_M ως ερέθισμα, οπότε η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

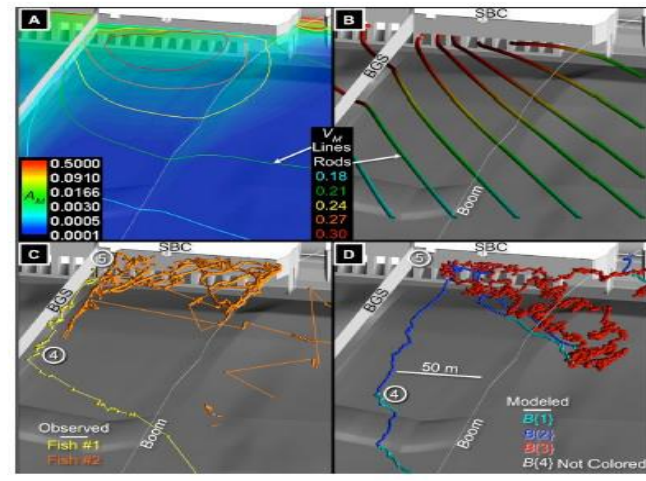
$$I^t = \log \frac{A_M^t}{A_0} \quad (2.5-22)$$

Και τα δύο μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τον κατακόρυφο προσανατολισμό ως ξεχωριστή απόφαση συμπεριφοράς που επηρεάζεται από τη διαφορά της υδροστατικής πίεσης που δέχεται ο ιχθύς στο βάθος που βρίσκεται την χρονική στιγμή t και της πίεσης του βάθους που ήδη έχει εγκλιματιστεί. Η κολύμβηση προς εγκλιματισμένο βάθος ως απόφαση συμπεριφοράς υιοθετείται όταν η διαφορά μεταξύ της θέσης του ιχθύος και του βάθους στο οποίο ο ιχθύς έχει εγκλιματιστεί, ξεπεράσει την οριακή τιμή ή το κατώφλι k_i :

$$E_t = |I^t_i - I^t_a| > k_i \quad (2.5-23)$$

Όπου I^t_i η αντιληπτή ένταση της πίεσης στην θέση (βάθος) του ιχθύος την χρονική στιγμή t και I^t_a η αντιληπτή ένταση της πίεσης στην οποία ο ιχθύς έχει ήδη εγκλιματιστεί.

$$SQD = \Delta t * S_f * D_a \quad (2.5-24)$$

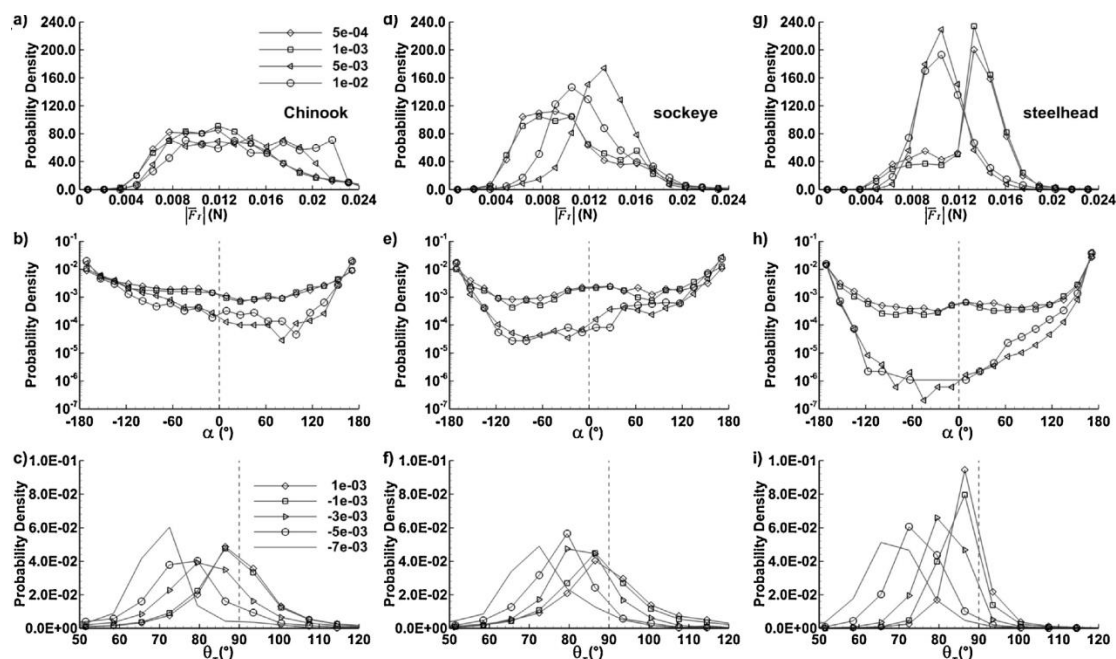


Εικόνα 2.5-6: Χαρακτηριστικά πεδίου ροής και τροχιές ιχθύων. (A) Ισομεγέθεις γραμμές του πεδίου επιταχύνσεων στην περιοχή προσομοίωσης, (B) μέγεθος ταχύτητας ροής, (C) τροχιά πραγματικού ιχθύ, (D) τροχιά προσομοιωμένου ιχθύ [πηγή: Goodwin et al., 2014].

Να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι η δομή του μοντέλου που εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία έχει βασιστεί στο ELAM (*Eulerian-Lagrangian Agent Method*) μοντέλο από τους Goodwin et al. (2014) και λαμβάνει υπόψη τις τρεις συμπεριφορές από τις τέσσερις (βλ. παρ. 2.4.3) γιατί δεν προσομοιώνεται η τρισδιάστατη κίνηση του ιχθύ αλλά η δισδιάστατη. Επίσης, θεωρούμε ότι ο ιχθύς περιβάλλεται από την ελλειψοειδή περιοχή αντίληψης του (*sensory onoid*) και ως βασικό υδροδυναμικό ερέθισμα δέχεται το μέγεθος της επιτάχυνσης του πεδίου ροής. Η διαφορά που θα αντιληφθεί ο ιχθύς μεταξύ της επιτάχυνσης που δέχεται την χρονική στιγμή t και της επιτάχυνσης που ήδη έχει εγκλιματιστεί θα ενεργοποιήσει την αντίστοιχη συμπεριφορά.

2.5.4. Arenas et al., 2015

Οι Arenas et al. παρουσίασαν μία μελέτη που επικεντρώθηκε μεταξύ των επιταχύνσεων του πεδίου ροής και της συμπεριφοράς κολύμβησης των νεαρών ιχθύων, παράγοντας κατανομές πιθανοτήτων με την ώθηση των ιχθύων και της κατεύθυνσης των ιχθύων για διαφορετικές τιμές επιταχύνσεων, όπως φαίνονται στις παρακάτω εικόνες. Οι προσομοιώσεις έγιναν στα φράγματα Rocky Reach και Priests Rapids στις ΗΠΑ.



Εικόνα 2.5-7: Κατανομές πιθανοτήτων ώθησης των ιχθύων F_t (πρώτη γραμμή), γωνίας α (δεύτερη γραμμή) και θ_T (τρίτη γραμμή) για τρία είδη ιχθύων: (α) Σολομός Chinook, (β) Σολομός Sockeye και (γ) Σολομός Steelhead [πηγή: Arenas et al., 2015]

Οι κύριες πτυχές της μελέτης είναι:

1. Οι υπολογιστικές υδροδυναμικές προσομοιώσεις έγιναν με τη χρήση του ANSYS FLUENT για την επίλυση των κατά Reynolds ολοκληρωμένων εξισώσεων Navier-Stokes και υπολογίστηκαν τα χαρακτηριστικά της ροής.
2. Επιλύθηκε ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα για τον υπολογισμό της ώθησης των ιχθύων σε κάθε περιοχή.
3. Καθορίστηκαν οι συνιστώσες της ώθησης των ιχθύων, ο προσανατολισμός των ιχθύων και ο χρόνος κολύμβησης.
4. Δημιουργήθηκαν οι κατανομές πιθανοτήτων για επιλεγμένες τιμές επιταχύνσεων της ροής.

Πραγματοποιήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

1. Ο συντελεστής οπισθέλκουσας C_{df} καθορίστηκε υποθέτοντας ότι ο ιχθύς παρασύρεται από το ρεύμα.
2. Η δύναμη οπισθέλκουσας F_D και η δύναμη ώθησης του ιχθύος F_T υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας την ταχύτητα του ιχθύος και την ταχύτητα εδάφους από τα δεδομένα μετρήσεων.
3. Αν $F_T < 0.6 * 10^{-3} N$ τότε ο ιχθύς συμπαράσυρεται και

4. Αν $F_T > 0.6 * 10^{-3} N$ τότε ο συντελεστής οπισθέλκουσας και η δύναμη οπισθέλκουσας υπολογίζονται για την κολύμβηση του ιχθύος, καθώς και η δύναμη ώθησης του ιχθύος, παράγοντας γωνίες προσανατολισμού του ιχθύ.

Χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$m_f \frac{d\vec{u}_g}{dt} = \vec{F}_D + \vec{F}_T \quad (2.5-25)$$

$$\vec{F}_D = -0.5\rho|\vec{u}_s|u_s A C_{df} \quad (2.5-26)$$

Όπου u_g η ταχύτητα εδάφους και m_f η μάζα του ιχθύος, F_D, F_T είναι η δύναμη ώθησης του ιχθύος και η δύναμη οπισθέλκουσας, u_s η ταχύτητα κολύμβησης του ιχθύος και A η επιφάνεια αναφοράς που εξαρτάται από τον συντελεστή οπισθέλκουσας C_{df} :

$$C_{df} = \begin{cases} \text{κολύμβηση} & \begin{cases} \frac{493.9}{Re_f^{0.922}}, \text{ αν } Re_f > 2000 \quad (2.5 - 27) \\ \frac{24}{Re_s} (1 + b_1 Re_s^{b_2}) + \frac{b_3 Re_s}{b_4 + Re_s}, \text{ αν } Re_f \leq 2000 \quad (2.5 - 28) \end{cases} \\ \text{συμπαράσυρση} & \left\{ \frac{0.072}{Re_f^{0.2}} \right. \quad (2.5 - 29) \end{cases}$$

Όπου $Re_f = \rho * |\vec{u}_s| * \frac{L}{\mu}$ είναι ο αριθμός Reynolds του ιχθύ και Re_s ο αριθμός Reynolds μίας σφαίρας που έχει τον ίδιο όγκο με τον ιχθύ, καθώς και οι συντελεστές:

$$b_1 = \exp(2.3288 - 6.4581\gamma + 2.4486\gamma^2) \quad (2.5-30)$$

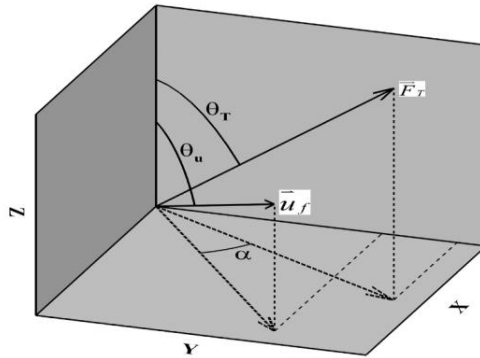
$$b_2 = 0.0964 + 0.5565\gamma \quad (2.5-31)$$

$$b_3 = \exp(4.905 - 13.8944\gamma + 18.422\gamma^2 - 10.2599\gamma^3) \quad (2.5-32)$$

$$b_4 = \exp(1.4681 + 12.2584\gamma - 20.7322\gamma^2 - 10.2599\gamma^3) \quad (2.5-33)$$

Όπου $\gamma = \frac{s}{S_f}$ με s την επιφάνεια της σφαίρας που έχει τον ίδιο όγκο με τον ιχθύ και S_f η πραγματική επιφάνεια του ιχθύ.

Στην έρευνα τους οι Arenas et al. χρησιμοποίησαν μετατροπή συντεταγμένων σχετίζοντας τον προσανατολισμό του ιχθύ με την ταχύτητα ροής παίρνοντας έτσι αποτελέσματα ανεξάρτητα από το Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Η γωνία μεταξύ του κατακόρυφου άξονα και της δύναμης ώθησης του ιχθύ υποδηλώνεται ως θ_T και μεταξύ του κατακόρυφου άξονα και του διανύσματος της ταχύτητας ροής ως θ_u . Αλλαγές στο βάθος του νερού προσομοιώνονται από το θ_T , με $\theta_T < 90^\circ$, που αντιπροσωπεύει την κολύμβηση του ιχθύ προς τα πάνω και όταν $\theta_T > 90^\circ$ προς τα κάτω. Οι γωνίες μεταξύ της προβολής της δύναμης ώθησης και του διανύσματος της ταχύτητας ροής πάνω στο ΧΥ επίπεδο δίνεται ως α με $\alpha = 0^\circ$ και $\alpha = \pm 180^\circ$ υποδηλώνοντας κολύμβηση στην ίδια φορά και στην αντίθετη φορά με τη ροή αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.5-8: Γωνίες που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της συμπεριφοράς ιχθύος. Δύναμη ώθησης F_T και ταχύτητα ροής u_f [πηγή: Arenas et al., 2015].

2.5.5. Gao et al., 2016

Οι Gao et al. ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο που προσομοιώνει τροχιές εικονικών ιχθύων μέσα από κατακόρυφες διόδους ιχθύων. Προσομοιώνεται το ίδιο πεδίο ροής της κατακόρυφου διόδου όπως παρουσιάζεται στην πειραματική διάταξη της μελέτης των Rodriguez et al. (2011). Οι πιο σχετικές χαρακτηριστικές παράμετροι από το πεδίο ροής που επηρεάζουν περισσότερο, θεωρούνται ότι είναι το διάνυσμα της ταχύτητας ροής και η κινητική ενέργεια τύρβης (ΤΚΕ). Η τροχιά του ιχθύ στο προσομοιωμένο πεδίο ροής λαμβάνεται από μία μέθοδο ELAM από τους Goodwin et al. (2006, 2014). Οι προσομοιωμένες τροχιές του εικονικού ιχθύος συγκρίνονται με τις πειραματικές από την έρευνα των Rodriguez et al. (2011).

Τα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου είναι τα εξής:

1. Η γεωμετρία της προσομοιωμένης διόδου είναι ακριβώς η ίδια με την πειραματική διάταξη.
2. Οι υπολογιστικές υδροδυναμικές προσομοιώσεις έγιναν με τη χρήση του ANSYS FLUENT για την επίλυση των κατά Reynolds ολοκληρωμένων εξισώσεων Navier-Stokes και υπολογίστηκαν τα χαρακτηριστικά της ροής για δύο διαστάσεις.
3. Οι ιχθύες κινούνται αντίθετα στην κατεύθυνση της ροής του νερού.
4. Υιοθετείται ο ορισμός της περιοχής αντίληψης (sensory query distance) γύρω από τον ιχθύ όπως προτάθηκε από τους Goodwin et al. (2006):

$$SQD = \Delta t * S_f * D_a \quad (2.5-34)$$

5. Γίνεται η υπόθεση ότι ο ιχθύς θα αντιδράσει σε έναν παράγοντα σε απόσταση ίση με 1 φορά το μήκος του σώματος του ιχθύος με τυχαίες διακυμάνσεις ($0 < RN < 1$) και η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$SQD = L_f * (1 + 0.5 * RN) \quad (2.5-35)$$

6. Εφαρμόζεται η συμπεριφορά που αφορά τον προσανατολισμό του ιχθύος, κατά την οποία τα διανύσματα της ταχύτητας της ροής μαζί με τις επιθυμητές τιμές ΤΚΕ, οι ιχθύες θα ακολουθούν σχεδόν πάντα θετικό ρεοτακτισμό (κίνηση προς τα ανάντη) εκτός αν δεν βρεθούν τα παραπάνω χαρακτηριστικά να ικανοποιούνται ταυτόχρονα οπότε και θα ακολουθήσει κίνηση προς τα κατόντη.
7. Επίσης, η απόσταση που μπορεί να κινηθεί ο ιχθύς σε κάθε χρονικό βήμα δεν μπορεί να ξεπεράσει την περιοχή αντίληψής του SQD.

$$\Delta \vec{X}_{water} = \vec{V}_{water} * \Delta t \quad (2.5-36)$$

$$\Delta \vec{X}_{fish} = \vec{V}_{fish} * \Delta t \quad (2.5-37)$$

V_{water}, V_{fish} οι ταχύτητες του νερού και ιχθύος στο κέντρο του κύκλου αντίληψης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1. Γενικά

Το υδροδυναμικό μοντέλο ανοιχτού κώδικα που εφαρμόζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι το Telemac-2D, το οποίο προσομοιώνει τη ροή με ελεύθερη επιφάνεια σε 2 διαστάσεις. Επιλύει τις εξισώσεις συνέχειας και διατήρησης της ορμής που περιγράφουν το πεδίο ροής σε υδάτινα σώματα. Χρησιμοποιεί τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων ή διαφορικών όγκων (προκαθορισμένη μέθοδος είναι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων), καθώς και ένα υπολογιστικό πλέγμα από τριγωνικά στοιχεία. Σε κάθε σημείο του πλέγματος, το πρόγραμμα υπολογίζει το βάθος του νερού (h) και τις 2 συνιστώσες της ταχύτητας (u, v). Μπορούν να προσομοιωθούν μη μόνιμες και μόνιμες συνθήκες ροής και να ληφθούν υπόψη τα εξής:

- Διάδοση κυμάτων μεγάλου μήκους
- Τριβή στον πυθμένα
- Επίδραση της περιστροφής της Γης (Coriolis effect)
- Επίδραση μετεωρολογικών παραγόντων, όπως ατμοσφαιρική πίεση και αέρας
- Τύρβη
- Ροή σε ποταμό
- Παλιρροϊκές πλημμύρες
- Καρτεσιανές ή πολικές συντεταγμένες
- Ξηρές περιοχές στο υπολογιστικό πεδίο (π.χ. πλημμυρική κοίτη)
- Διάχυση ρύπου με όρους πηγής κτλ.

Το Telemac-2D μπορεί να εφαρμοσθεί σε διάφορα πεδία στην επιστήμη του μηχανικού, αφού πρόκειται για ένα ισχυρό εργαλείο προσομοίωσης των υδάτινων συστημάτων. Η σχεδίαση λιμενικών και ακτομηχανικών έργων, όσον αφορά στη θάλασσα, καθώς και η μελέτη των επιπτώσεων ενός φράγματος ή της μεταφοράς ρύπων, όσον αφορά στους ποταμούς, αποτελούν μόνο κάποια παραδείγματα εφαρμογής του μοντέλου.

3.2. Βασικές εξισώσεις του μοντέλου

Το Telemac-2D επιλύει ταυτόχρονα τις παρακάτω τέσσερις υδροδυναμικές εξισώσεις ρηχών νερών Saint-Venant:

1. Εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u}\vec{\nabla}h + h\text{div}\vec{u} = S_h \quad (3.2-1)$$

2. Εξίσωση ορμής κατά την διεύθυνση x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u}\vec{\nabla}u = -g\frac{\partial z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h}\text{div}(hv_t\vec{\nabla}u) \quad (3.2-2)$$

3. Εξίσωση ορμής κατά την διεύθυνση y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u}\vec{\nabla}v = -g\frac{\partial z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h}\text{div}(hv_t\vec{\nabla}v) \quad (3.2-3)$$

4. Εξίσωση διατήρησης ιχνηθέτη:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u}\vec{\nabla}T = S_T + \frac{1}{h}\text{div}(hv_t\vec{\nabla}T) \quad (3.2-4)$$

Όπου:

h (m) το βάθος ροής
 u, v (m/s) οι συνιστώσες της ταχύτητας
 t (s) ο χρόνος
 x, y (m) συντεταγμένες κατά την οριζόντιο
 g (m/s²) η επιτάχυνση της βαρύτητας
 v_t, v_T (m²/s) η τυρβώδης συνεκτικότητα
 Z (m) το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας
 S_h (m/s) ο όρος πηγής της εξίσωσης συνέχειας
 S_x, S_y (m/s²) όροι πηγής των εξισώσεων ποσότητας κίνησης
 S_T ($\frac{g}{s}$) ο όρος πηγής του ιχνηθέτη

Οι άγνωστες μεταβλητές στις παραπάνω εξισώσεις είναι το βάθος νερού h , η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας u , η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας v . Οι συντεταγμένες x, y είναι σε καρτεσιανό σύστημα, αλλά μπορούν να δοθούν και σε πολικές συντεταγμένες. Οι όροι S_x, S_y (m/s²) είναι όροι πηγής που αντιπροσωπεύουν τον αέρα, την τριβή του πυθμένα, την δύναμη Coriolis ή την πηγή της ορμής μέσα στο πεδίο.

Στην περίπτωση που η ροή δεν μπορεί να θεωρηθεί παράλληλη και οι συνιστώσες της ταχύτητας στην κατακόρυφη διεύθυνση δεν είναι αμελητέες, μπορεί να γίνει προσθήκη κάποιων επιπλέον όρων στις εξισώσεις Saint Venant, όπως αναφέρεται και στη βιβλιογραφία (Serre, Boussinesq, Korteweg, De Vries). Για τη θεώρηση Boussinesq, προστίθενται οι παρακάτω όροι στο δεξί μέλος των εξισώσεων Saint Venant (εξισώσεις Boussinesq):

$$-\frac{H_0^2}{6} \text{grad} \left[\text{div} \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) \right] + \frac{H_0}{2} \text{grad} \left[\text{div} \left(H_0 \frac{\partial u}{\partial t} \right) \right] \quad (3.2-5)$$

3.2.1. Τυρβώδης ροή

Η γένεση της τύρβης προκαλείται από αστάθεια της ροής οφειλόμενη είτε στις συνθήκες ροής είτε σε τυχαία διατάραξη και εμφανίζεται κατά κανόνα σε περιοχές σημαντικών δυνάμεων συνεκτικότητας, όπως είναι οι περιοχές σημαντικών κλίσεων της ταχύτητας.

Ως μοντέλα τύρβης χαρακτηρίζονται οι εξισώσεις ή τα συστήματα εξισώσεων που επιτρέπουν είτε τον προσδιορισμό της τυρβώδους συνεκτικότητας, είτε γενικότερα τον προσδιορισμό των τυρβωδών τάσεων και επομένως, καθιστούν δυνατή την επίλυση της τυρβώδους ροής.

Για την περιγραφή της τυρβώδους ροής στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται το συνηθέστερο μοντέλο k-E, όπου k είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια και E η απόσβεση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Για τα δύο αυτά μεγέθη το Telemac-2d λύνει τις παρακάτω εξισώσεις μεταφοράς:

Για την τυρβώδη κινητική ενέργεια k :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \nabla k = \frac{1}{h} \text{div} \left(h \frac{v_t}{1.0} \nabla k \right) + P - \varepsilon + G \quad (3.2-6)$$

Για την απόσβεση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ε :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \nabla \varepsilon = \frac{1}{h} \operatorname{div} \left(h \frac{v_t}{1.3} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} + (1.44P - 1.92\varepsilon) - 1.44 \frac{\varepsilon}{k} G \quad (3.2-7)$$

Όπου P είναι ο όρος παραγωγής ενέργειας λόγω τύρβης και G είναι ο όρος για τις βαρυτικές δυνάμεις. Τα δύο μεγέθη k-ε σχετίζονται με την τυρβώδη συνεκτικότητα με την σχέση:

$$v_t = 0.09 \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.2-8)$$

3.3. Περιοχή Μελέτης

3.3.1 Περιοχή εφαρμογής – Jedsted Mill Fish Farm

Για την βαθμονόμηση και επιβεβαίωση του μαθηματικού μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων ήταν απαραίτητο να επιλεγεί μια περιοχή για την οποία θα έχουν γίνει έρευνες σχετικά με την κίνηση των ιχθύων κατά την κατάντη μετανάστευση τους και να υπάρχουν δεδομένα από τις μελέτες αυτές. Επίσης, είναι απαραίτητο να υπάρχουν δεδομένα για το υδροδυναμικό πεδίο, όπως η βαθυμετρία και οι ταχύτητες ροής του πεδίου. Η περιοχή που επιλέχθηκε για την εφαρμογή του μοντέλου είναι ένα τμήμα του ποταμού Konge στη Δυτική Δανία και συγκεκριμένα στην περιοχή Jedsted Mill Fish Farm, 7 km ανάντη της θάλασσας Wadden, μιας παλιρροιακής ζώνης στο νοτιοανατολικό τμήμα της Βόρειας θάλασσας. Για την περιοχή αυτή διατέθηκαν δεδομένα βαθυμετρίας και ταχύτητας καθώς και δεδομένα μετρήσεων από τροχιές παρατηρούμενων μεταναστευτικών ιχθύων (Svendson *et al.*, 2011).



Εικόνα 3.3-1: Περιοχή Jedsted Mill Fish Farm, Δανία [πηγή: Google Earth]

Ο ποταμός Konge, όπως αναφέρθηκε, εκβάλλει στην θάλασσα Wadden, έχει μήκος 70 km και έχει μια μέση κλίση 0,5‰. Η μέση ετήσια παροχή στην εκβολή είναι περίπου 7 m³/s. Ο ποταμός στο μεγαλύτερο μέρος του έχει πλάτος 8m με 15m και βάθος 0.5m με 1.4m, ενώ μαζί με άλλους 32 μικρούς παραποτάμους υποστηρίζει πληθυσμούς του Ατλαντικού Σολομού και της Καφέ Πέστροφας. Η περιοχή του Jedsted Mill Fish Farm (55° 23'N; 8° 43' E) βρίσκεται ανάντη στα 90m από έναν υπερχειλιστή λεπτής στέψης, ο οποίος επηρεάζει την υδραυλική κατάσταση του ποταμού. Ένα μέρος του

νερού που έρχεται από τα ανάντη του ποταμού εκτρέπεται στην περιοχή του ιχθυοτροφείου (Mill Fish Farm) κάτω από μία ξύλινη γέφυρα (27m) και μέσω εσχάρων. Η περιοχή μεταξύ της γέφυρας και των εσχάρων στην είσοδο του fish farm ορίστηκε ως η ζώνη απομείωσης του νερού. Το εκτρεπόμενο νερό περνάει μέσα από τις λίμνες του ιχθυοτροφείου και επιστρέφει στο ποτάμι κατάντη του υπερχειλιστή. Η ποσότητα του νερού που δεν εκτρέπεται συνεχίζει κατάντη και πέρα του υπερχειλιστή. Οι λίμνες του ιχθυοτροφείου, ο υπερχειλιστής, η γέφυρα και οι εσχάρες δεν εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

Αναφορικά με το υπόβαθρο του πυθμένα του ποταμού Konge, η κοίτη του ποταμού περιλαμβάνει κυρίως άμμο με παρεμβαλλόμενες διάσπαρτες περιοχές χαλικιού. Η βλάστηση στο ποτάμι κατά την περίοδο των πειραματικών μετρήσεων για τους μελετώμενους ιχθύες ήταν έντονη, κυρίως από το είδος *Sparganium erectum* ή αλλιώς σπαργάνιο, με 50% επικάλυψη. Επίσης, βλάστηση παρατηρείται και κατά μήκος των οχθών του ποταμού απέναντι από την είσοδο του ιχθυοτροφείου.

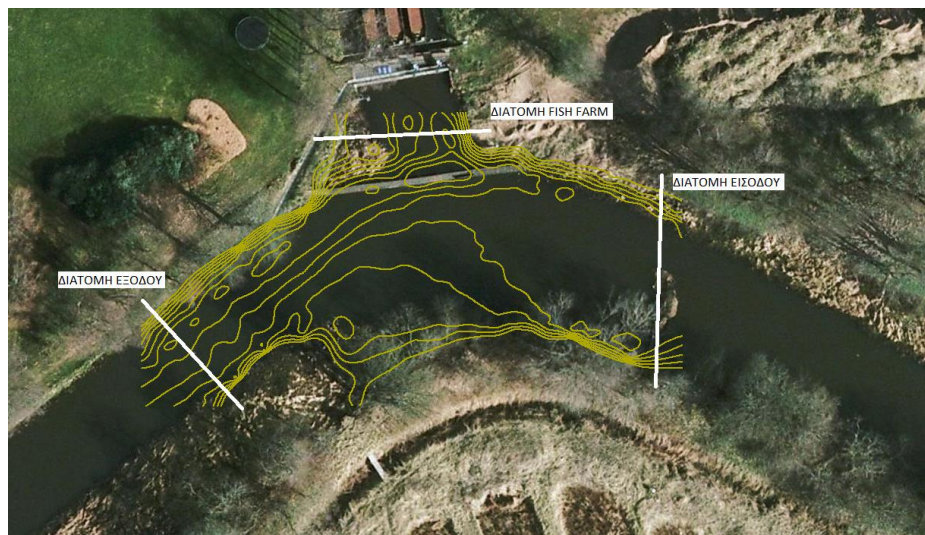


Εικόνα 3.3-2: Επικρατούσα βλάστηση στην περιοχή (*Sparganium erectum*) [πηγή: Wikipedia.org]

3.3.2 Δεδομένα βαθυμετρίας και ταχύτητας, παροχές και τραχύτητα πυθμένα ποταμού

3.3.2.1 Δεδομένα βαθυμετρίας και ταχύτητας

Για την περιοχή μελέτης δόθηκαν δεδομένα GIS με τη μορφή ισοϋψών βάθους και μέσης ταχύτητας. Οι τιμές των μετρήσεων της βαθυμετρίας στο πεδίο κυμαίνονται από 0.30m έως 2.05m και απεικονίζονται στην εικόνα 3.3-3 από τις ισοβαθείς με το κίτρινο χρώμα. Οι μετρήσεις του βάθους πραγματοποιήθηκαν με την χρήση φορητού GPS.



Εικόνα 3.3-3: Διακύμανση βάθους από τις μετρήσεις στο πεδίο [πηγή: Svendsen et al., 2011]. Οι διατομές στις εισόδους και εξόδους φαίνονται με λευκές γραμμές.

Αντίστοιχα, οι τιμές των μετρήσεων της μέσης ταχύτητας στο πεδίο ροής κυμαίνονται από 0m/s έως 0.45m/s και απεικονίζονται από τις ισοδυναμικές γραμμές με το κόκκινο χρώμα στην εικόνα 3.3-4. Οι μέσες ταχύτητες μετρήθηκαν με την χρήση φορητού μιλίσκου σε απόσταση $0.6xD$, όπου D το βάθος νερού, δηλαδή σε βάθος 60% από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού (Olsson et. al 2001, Kanno and Vokoun 2010).



Εικόνα 3.3-4: Διακύμανση μέσης ταχύτητας από τις μετρήσεις στο πεδίο γραμμές [πηγή: Svendsen et al., 2011]. Οι διατομές στις εισόδους και εξόδους φαίνονται με λευκές γραμμές.

Επίσης, στα δεδομένα συμπεριλαμβάνονται και τα σταθερά όρια της περιοχής μελέτης, δηλαδή οι όχθες του ποταμού (*J. Svendsen*), όπου με τη βοήθεια του προγράμματος γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών *ArcMap* έγινε προβολή των σημείων αυτών ώστε να αναγνωρισθεί το σύστημα συντεταγμένων με το οποίο έχουν δοθεί. Οι συντεταγμένες X και Y απεικονίζονται στο σύστημα UTM (Universal Transverse Mercator coordinate system), δηλαδή στο παγκόσμιο εγκάρσιο Μερκατορικό σύστημα συντεταγμένων και συγκεκριμένα στη ζώνη 32N στην οποία περιλαμβάνεται ολόκληρη η Δανία. Το εξαγόμενο αρχείο περιλαμβάνει τις όχθες του ποταμού σε μορφή σημείων X και Y. Το πρώτο αυτό στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων είναι απαραίτητο όσον αφορά την αναγνώριση του συστήματος συντεταγμένων, ώστε να στο επόμενο βήμα να γίνει επεξεργασία των δεδομένων ταχύτητας και βάθους.

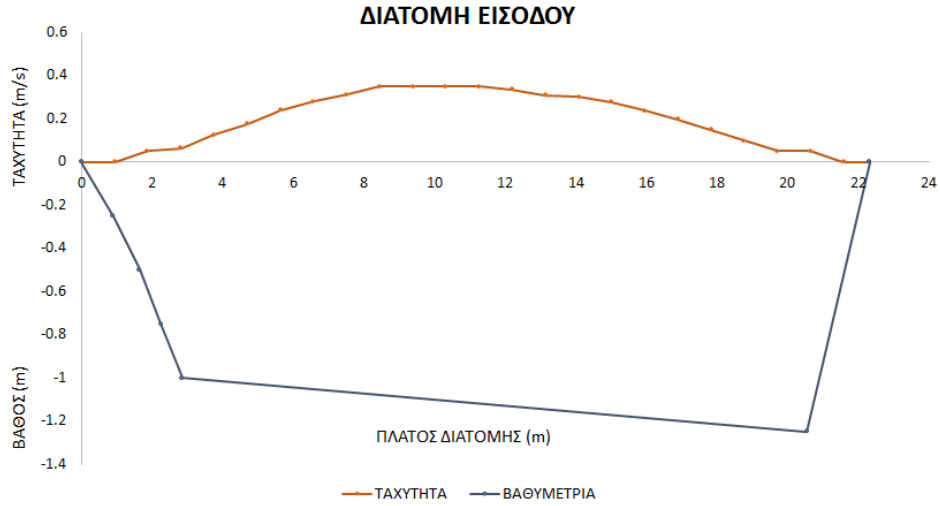


Εικόνα 3.3-5: Οι όχθες του ποταμού της περιοχής μελέτης σε σύστημα συντεταγμένων UTM και στη ζώνη 32N, [*ArcMap*].

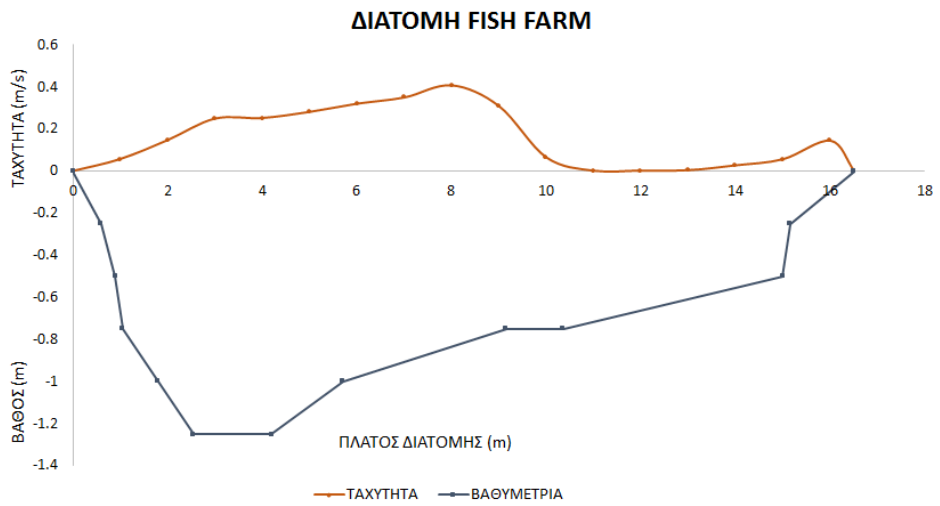
Αντίστοιχα, επεξεργάζονται με τον ίδιο τρόπο και τα δεδομένα ταχύτητας και βαθυμετρίας ώστε τα εξαγόμενα αποτελέσματα να είναι σε μορφή σημείων με X και Y συντεταγμένες και τιμές βάθους και ταχύτητας που να αντιστοιχούν στα σημεία αυτά. Τα δεδομένα του βαθυμετρίας είναι απαραίτητα για την κατασκευή της γεωμετρίας του υπολογιστικού πλέγματος για το υδροδυναμικό μοντέλο, ενώ τα δεδομένα της ταχύτητας του πεδίου ροής είναι απαραίτητα για την βαθμονόμηση και επιβεβαίωση του υδροδυναμικού μοντέλου.

3.3.2.2. Υπολογισμός παροχών

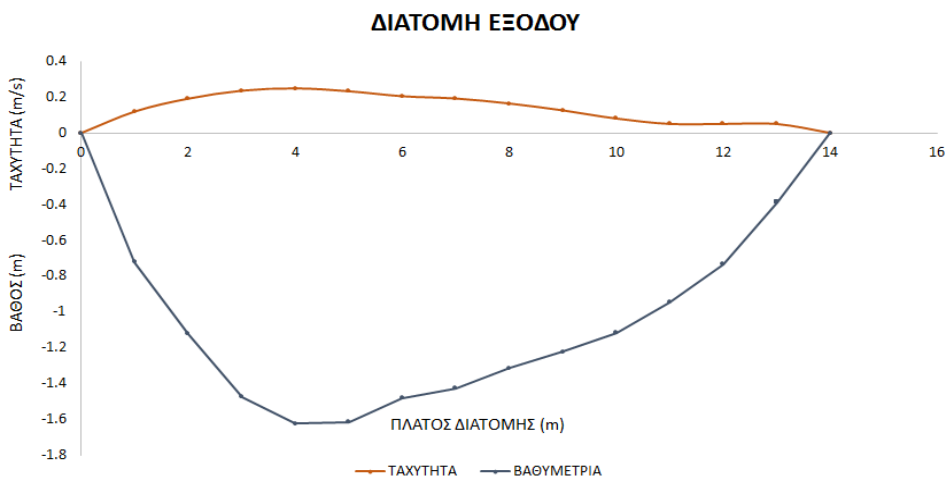
Ο υπολογισμός των παροχών του πεδίου ροής έγινε με βάση τα δεδομένα ταχυτήτων και βαθυμετρίας σε χαρακτηριστικές διατομές του ποταμού. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη χαρακτηριστική διατομή ορίζεται στα ανάντη της περιοχής μελέτης (*ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΙΣΟΔΟΥ*), η δεύτερη διατομή που εκτρέπεται το νερό στην είσοδο του *Jedsted Mill fish farm* (*ΔΙΑΤΟΜΗ FISH FARM*) και η τελευταία διατομή στα κατόντη της περιοχής (*ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΞΟΔΟΥ*) (όπως φαίνονται στις εικόνες 3.3-3 και 3.3-4 με τις λευκές γραμμές).



Εικόνα 3.3-6: Βαθυμετρία και μέση ταχύτητα στην διατομή εισόδου στα ανάντη της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 3.3-7: Βαθυμετρία και μέση ταχύτητα στη διατομή στην είσοδο του fish farm στην περιοχή μελέτης.



Εικόνα 15.3-8: Βαθυμετρία και μέση ταχύτητα στη διατομή εξόδου στα κατόντη της περιοχής μελέτης.

Οι διατομές χωρίστηκαν σε μικρότερα νοητά στοιχεία i και υπολογίστηκαν τα εμβαδά ξεχωριστά για κάθε στοιχείο καθώς και οι μέσες τιμές των ταχυτήτων. Οι επιμέρους παροχές υπολογίστηκαν με βάση την Εξίσωση Συνέχειας:

$$q_i = V_i * A_i \quad (3.3-1)$$

Η τελική παροχή κάθε διατομής είναι το άθροισμα των επιμέρους παροχών:

$$Q = \sum q_i = \sum (V_i * A_i) \quad (3.3-2)$$

Από τους υπολογισμούς η παροχή προέκυψε στην διατομή εισόδου στα ανάντη στα 5.52 m³/s, στη διατομή του fish farm στα 2.79 m³/s και στη διατομή εξόδου στα κατάντη στα 2.46 m³/s. Να σημειωθεί ότι σφάλματα της τάξης του 5-8% στις μετρήσεις ταχύτητας του πεδίου είναι αποδεκτά και μπορεί να οφείλονται στην ακρίβεια των οργάνων, στον ανθρώπινο παράγοντα ή σε εξωτερικούς παράγοντες. Για τον λόγο αυτό, κατά την εφαρμογή του υδροδυναμικού μοντέλου, έγιναν δοκιμές στις οριακές συνθήκες των προσομοιώσεων σε ένα εύρος τιμών από 5 m³/s μέχρι 6 m³/s για την διατομή στα ανάντη και από τα 2 m³/s μέχρι τα 3 m³/s για την διατομή στο fish farm, ώστε να ικανοποιείται το ισοζύγιο μάζας του νερού και το πεδίο ροής να προσομοιάζει όσο το δυνατόν περισσότερο στις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν. Οι τελικές τιμές παροχών που επιλέγονται για τις οριακές συνθήκες του μοντέλου παρουσιάζονται στο υποκεφάλαιο της εφαρμογής και βαθμονόμησης του υδροδυναμικού μοντέλου.

3.3.2.3. Τραχύτητα πυθμένα ποταμού και συντελεστής Manning

Η επιλογή του κατάλληλου συντελεστή τραχύτητας του πυθμένα του ποταμού καθορίζει σημαντικά τη λειτουργία του υδροδυναμικού μοντέλου. Για τον καθορισμό της τραχύτητας του ποταμού χρησιμοποιείται η σχέση του Manning:

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{3}} \quad (3.3 - 3) \quad \text{όπου}$$

V (m/s) η μέση ταχύτητα ροής, n (s/m^{1/3}) ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning, R (m) η υδραυλική ακτίνα της διατομής και J η κατά μήκος κλίση του πυθμένα.

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του συντελεστή είναι το είδος και το μέγεθος των υλικών που συνθέτουν τον πυθμένα και τις όχθες του καναλιού καθώς και το σχήμα του. Ο Cowan (1956) ανέπτυξε μία μέθοδο για την εκτίμηση της επίδρασης των παραπάνω παραγόντων ώστε να προσδιοριστεί η τιμή του συντελεστή τραχύτητας για το κανάλι. Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται η σχέση:

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m \quad (3.3 - 4) \quad \text{όπου}$$

n_b : μία βασική τιμή του συντελεστή n για ευθύγραμμο, ομοιόμορφο και λείο κανάλι με φυσικά υλικά,

n_1 : ένας συντελεστής διόρθωσης για την επίδραση των ανωμαλιών του εδάφους στην κοίτη του ποταμού,

n_2 : ένας συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή του σχήματος και του μεγέθους της διατομής του ποταμού,

n_3 : ένας συντελεστής που λαμβάνει υπόψη εμπόδια στη ροή και

n_4 : ένας συντελεστής διόρθωσης που λαμβάνει υπόψη τους μαιανδρισμούς του καναλιού.

Η σχέση αυτή αναφέρεται στη μετατροπή του συντελεστή τραχύτητας λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση που επικρατεί κατά μήκος του πυθμένα του ποταμού.

Όπως έχει αναφερθεί και στην περιγραφή της περιοχής μελέτης, το υπόστρωμα του πυθμένα αποτελείται κυρίως από άμμο με διάσπαρτες περιοχές με χαλίκια. Επίσης, είναι γνωστό ότι στην περιοχή επικρατεί έντονη βλάστηση. Επειδή δεν δίνεται το ακριβές μέγεθος της άμμου και των χαλικιών, θεωρείται εδαφικό υλικό γήινο και όχι πετρώδες (*firm soil*) ώστε να γίνει επιλογή ενός εύρους ενδιάμεσων τιμών μεταξύ άμμου και χαλικιών για τον βασικό συντελεστή n_b .

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται το εύρος τιμών για κάθε συντελεστή n που τελικά επιλέγεται με βάση τα χαρακτηριστικά του ποταμού (πηγή: *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains, USGS*).

Πίνακας 3.3-1: Τιμές προσαρμογής συντελεστών τραχύτητας πυθμένα ποταμού σύμφωνα με την USGS.

Υπόστρωμα πυθμένα	Συντελεστές	Περιγραφή συντελεστών	Εύρος τιμών
Αμμώδες με διάσπαρτες περιοχές με χαλίκια	Βασικό χαρακτηριστικό καναλιού, n_b	Εδαφικό υλικό γήινο και όχι πετρώδες	0.025-0.032
	Ανομοιομορφία καναλιού, n_1	Λεία	0.000
	Αλλαγές στις διατομές, n_2	Εναλλασσόμενες	0.010-0.015
	Εμπόδια κατά μήκος του καναλιού, n_3	Ελάχιστα	0.005-0.015
	Βλάστηση, n_4	Υψηλή	0.025-0.050
	Μαιανδρικό σχήμα, m	Ελάχιστο	1.00

Από τον υπολογισμό προκύπτει ότι το αποδεκτό εύρος του συνολικού συντελεστή Manning κυμαίνεται από 0.065 έως 0.112.

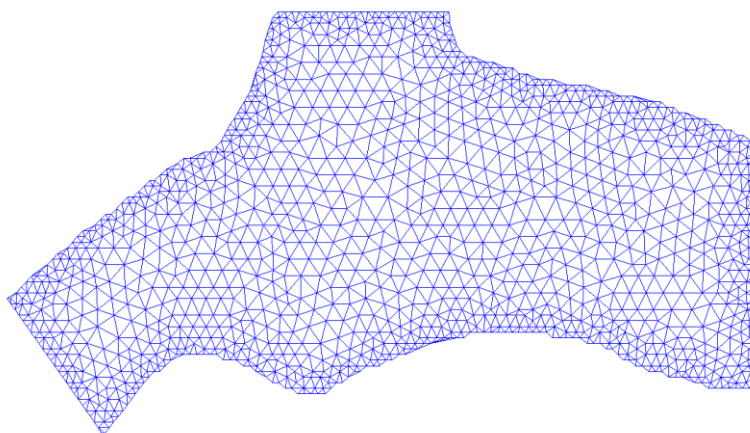
Η επιλογή των κατάλληλων συντελεστών Manning και η κατανομή τους στο πεδίο της περιοχής μελέτης έγινε με βάση την βαθμονόμηση του υδροδυναμικού μοντέλου και αναλύεται παρακάτω στην εφαρμογή του.

3.4. Εφαρμογή και βαθμονόμηση του υδροδυναμικού μοντέλου στην περιοχή μελέτης

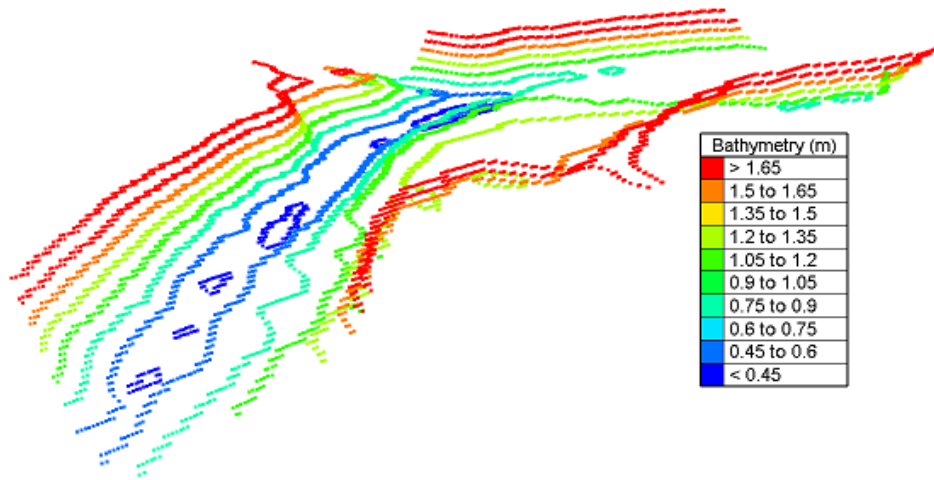
3.4.1 Διαμόρφωση υπολογιστικού πλέγματος και γεωμετρίας

Για την δόμηση του υπολογιστικού πλέγματος χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα *BlueKenue*. Το πρόγραμμα αυτό δίνει τη δυνατότητα κατασκευής δομημένου και μη δομημένου πλέγματος. Αρχικά έγινε προσπάθεια κατασκευής δομημένου πλέγματος αλλά το αποτέλεσμα δεν ήταν ικανοποιητικό. Τελικά χρησιμοποιήθηκε μη δομημένο πλέγμα με τριγωνικά στοιχεία, για το οποίο πραγματοποιείται ανεξαρτησία πλέγματος με πύκνωση των στοιχείων έως ότου να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματα. Για την δόμηση του πλέγματος είναι απαραίτητα τα σταθερά όρια του ποταμού και η απόσταση μεταξύ των κόμβων.

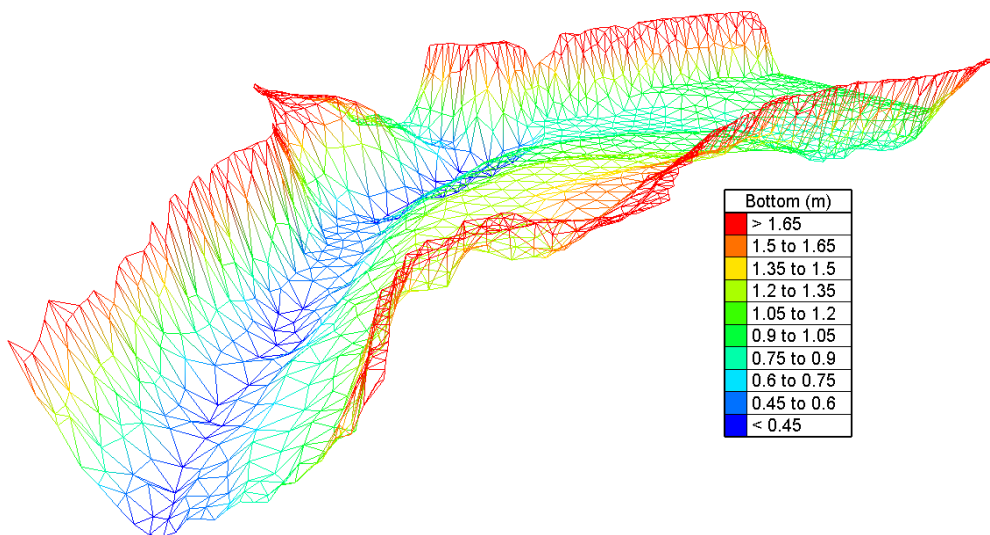
Η γεωμετρία του πυθμένα δημιουργήθηκε με χωρική παρεμβολή των σημείων της βαθυμετρίας στους κόμβους του πλέγματος. Επιλέχθηκε αρχικά ένα σχετικά αραιό πλέγμα με απόσταση κόμβων ίση με 1.5m. Ο συνολικός αριθμός των κόμβων προκύπτει 1378 και ο αριθμός των τριγωνικών στοιχείων 2480.



Εικόνα 3.4-1: Το μη δομημένο υπολογιστικό πλέγμα με απόσταση κόμβων 1.5m.



Εικόνα 3.4-2: Τρισδιάστατη διακύμανση βαθυμετρίας. Τα σημεία χρησιμοποιήθηκαν για την χωρική παρεμβολή στους κόμβους του πλέγματος. Τα βάθη κυμαίνονται από 0.30m έως 2.05m.



Εικόνα 3.4-3: Τρισδιάστατη απεικόνιση του πυθμένα μετά την παρεμβολή της βαθυμετρίας στο πλέγμα. Τα βάθη κυμαίνονται από 0.30m έως 2.05m.

3.4.2 Οριακές συνθήκες

Όπως αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο που περιγράφει την περιοχή μελέτης (3.3) και συγκεκριμένα στον υπολογισμό των παροχών, κατά τις προσομοιώσεις έγιναν δοκιμές με διαφορετικές τιμές παροχών στις οριακές συνθήκες του υδροδυναμικού μοντέλου. Ορίστηκαν τρεις οριακές συνθήκες στο πεδίο ροής, οι οποίες λαμβάνονται υπόψη από το Telemac-2d με την χρήση του προγράμματος Fudaa-Prepro. Οι τελικές οριακές συνθήκες που επιλέγονται έχουν ως εξής:

- Στην είσοδο του πεδίου, στα ανάντη, ορίζεται εισερχόμενη δεδομένη παροχή $Q = 5.66 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Στην διατομή εισόδου προς το Jedsted Mill fish farm ορίζεται εξερχόμενη δεδομένη παροχή $Q = 2.90 \text{ m}^3/\text{s}$ και δεδομένο σταθερό βάθος νερού 2m .
- Στην διατομή εξόδου προς τα κατάντη ορίζεται δεδομένο σταθερό βάθος νερού στα 2m .

Ακόμη, ως αρχική συνθήκη ορίστηκε σταθερό βάθος νερού $H = 2\text{m}$. Για την τριβή επιλέχθηκε ο νόμος του Manning, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Μοντέλο τύρβης επιλέχθηκε το k-E, όπου k είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια και E η απόσβεση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας.

Μια αρχική εκτίμηση του χρονικού βήματος έγινε με βάση τη συνθήκη CFL (Courant-Friedrich-Levy) σύμφωνα με την οποία θα πρέπει να ισχύει ότι:

$$C = \frac{u\Delta t}{\Delta x} + \frac{v\Delta t}{\Delta y} \leq C_{max} \quad \text{όπου } C_{max} = 1 \text{ και}$$

u, v (m/s) οι συνιστώσες της ταχύτητας

$\Delta x, \Delta y$ (m) οι διαστάσεις του πλέγματος

Δt (s) το χρονικό βήμα και

C (αδιάστατο) ο αριθμός Courant.

Τελικά χρονικό βήμα ορίζεται η τιμή 0.001s με συνολικό χρόνο προσομοίωσης έως ότου επέλθουν μόνιμες συνθήκες ροής σε όλο το πεδίο.

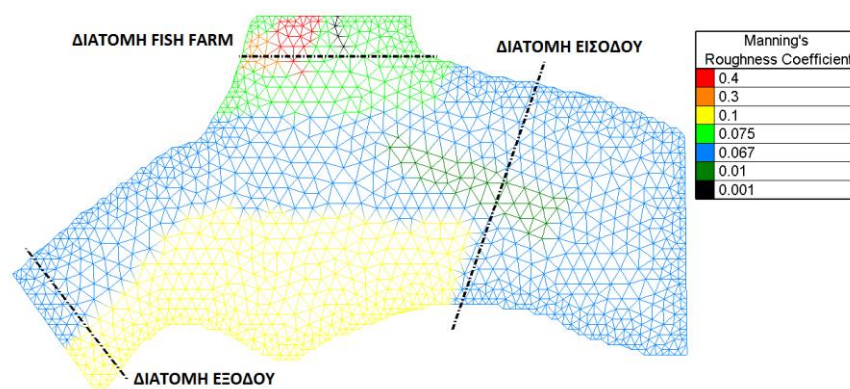
3.4.3 Εφαρμογή του υδροδυναμικού μοντέλου

Το μοντέλο βαθμονομήθηκε ύστερα από δοκιμές διαφόρων συνδυασμών συντελεστών Manning ώστε να καθοριστούν οι κατάλληλες τιμές αυτών καθώς και η κατανομή τους στο πεδίο, συγκρίνοντας τα προφίλ των πειραματικών τιμών των ταχυτήτων που έχουν καταγραφεί στο πεδίο και των τιμών των ταχυτήτων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις στις χαρακτηριστικές διατομές (είσοδος, fish farm και έξοδος).

Οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν περιλαμβάνουν προσομοιώσεις με κατανομή ενιαίου Manning σε όλη την περιοχή με τιμές 0.065, 0.075 και 0.085 και προσομοιώσεις με κατανομή εύρους τιμών σε διαφορετικά σημεία της περιοχής με τιμές από 0.001 έως 0.4. Συγκεκριμένα οι τιμές 0.001 και 0.4 επειδή βρίσκονται εκτός των αποδεκτών ορίων που έχουν υπολογιστεί για τον συντελεστή Manning, χρησιμοποιούνται σε πολύ μικρές περιοχές για την προσαρμογή του υδροδυναμικού πεδίου στο επιθυμητό αποτέλεσμα.

Η προσομοίωση με ενιαίο Manning αναμένεται να δώσει ομοιόμορφα αποτελέσματα στα προφίλ ταχυτήτων και δεν αντικατοπτρίζει την πραγματική κατάσταση σε ένα ποτάμι, οπότε καταλήγουμε στην χρήση ενός εύρους τιμών Manning κατανεμημένες στην περιοχή με τρόπο που θα αποδώσει καλύτερα το υδροδυναμικό πεδίο.

Η τελική περίπτωση προσομοίωσης του υδροδυναμικού μοντέλου που καταλήγουμε περιλαμβάνει 7 διαφορετικές τιμές συντελεστών Manning και κατανεμημένες στο πεδίο όπως φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 3.4-4: Τελική επιλογή και κατανομή συντελεστών Manning στο πεδίο και οι χαρακτηριστικές διατομές που επιλέγονται για τον έλεγχο των προφίλ ταχυτήτων με τις διακεκομμένες γραμμές.

Πιο αναλυτικά, επιλέγεται η τιμή 0.067 για το μεγαλύτερο μέρος του ποταμού, η τιμή 0.075 για την περιοχή απομείωσης του νερού (*water withdrawal zone*) στην είσοδο του fish farm και η τιμή 0.1 στις κάτω όχθες που αντιπροσωπεύει τις πολύ χαμηλές πειραματικές ταχύτητες νερού λόγω βλάστησης. Τα μικρότερα τμήματα, που εμφανίζονται κυρίως στην είσοδο του fish farm, εφαρμόζονται για καλύτερη προσαρμογή του προσομοιωμένου υδροδυναμικού πεδίου στο πραγματικό. Οι υψηλές τιμές Manning έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλές τιμές ταχυτήτων και αντίστοιχα χαμηλές τιμές Manning έχουν ως αποτέλεσμα υψηλές ταχύτητες νερού.

Επιλέγονται οι διατομές όπως φαίνονται στην εικόνα με τις διακεκομμένες γραμμές ώστε να υπάρχει πλήρης εικόνα της διακύμανσης των προφίλ ταχυτήτων με όλες τις τιμές του συντελεστή Manning. Ακολουθούν τα προφίλ ταχυτήτων στις χαρακτηριστικές διατομές όπου συγκρίνονται τα πειραματικά δεδομένα των ταχυτήτων και οι τιμές των ταχυτήτων που προκύπτουν από την προσομοίωση. Στις τιμές των πειραματικών μετρήσεων των ταχυτήτων έχει συμπεριληφθεί ποσοστό σφάλματος 7% (*De Doncker et al., 2007*). Επίσης, υπολογίζεται ο δείκτης συμφωνίας IA (*index of agreement*) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE (*root mean square error*) μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και των τιμών. Ο δείκτης συμφωνίας ο οποίος κυμαίνεται από 0 έως 1, δείχνει πόσο καλή συσχέτιση έχουν οι τιμές μεταξύ τους. Τιμές κοντά στο 1 αποδεικνύουν πολύ καλή συσχέτιση. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, το οποίο παίρνει τιμές από 0 έως 1, υποδεικνύει την απόκλιση μεταξύ των τιμών. Τιμές κοντά στο 0 αποδεικνύουν ελάχιστη απόκλιση.

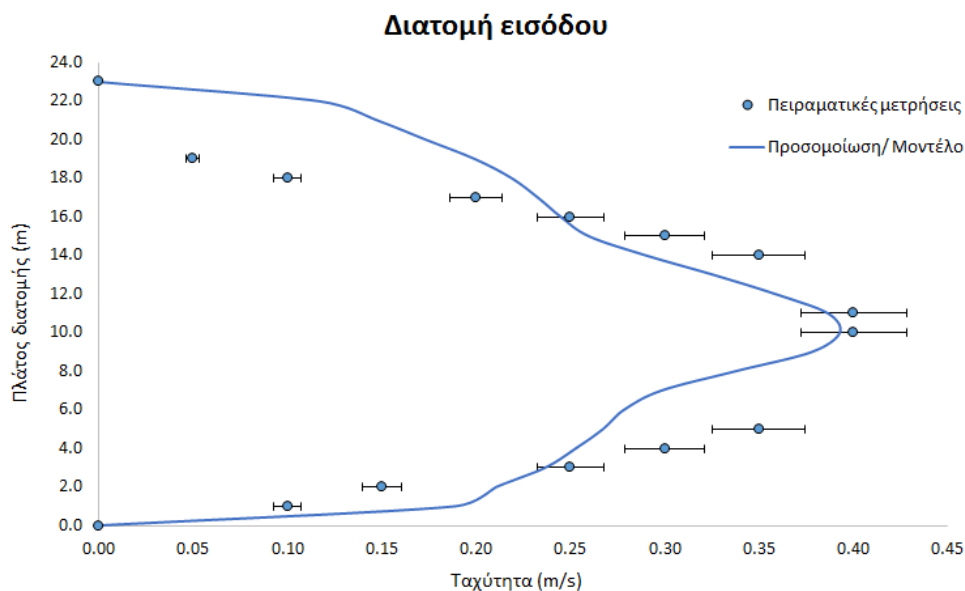
Οι εξισώσεις των IA και RMSE δίνονται ως εξής:

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (3.4-1)$$

Όπου $0 \leq IA \leq 1$. Επίσης n το πλήθος των μετρήσεων, O_i η τιμή που παρατηρείται και P_i η τιμή που προβλέπεται. Όσο πιο κοντά στο 1 είναι η τιμή του σφάλματος, τόσο καλύτερη συσχέτιση έχουν οι τιμές μεταξύ τους.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - A_i)^2}{n}} \quad (3.4-2)$$

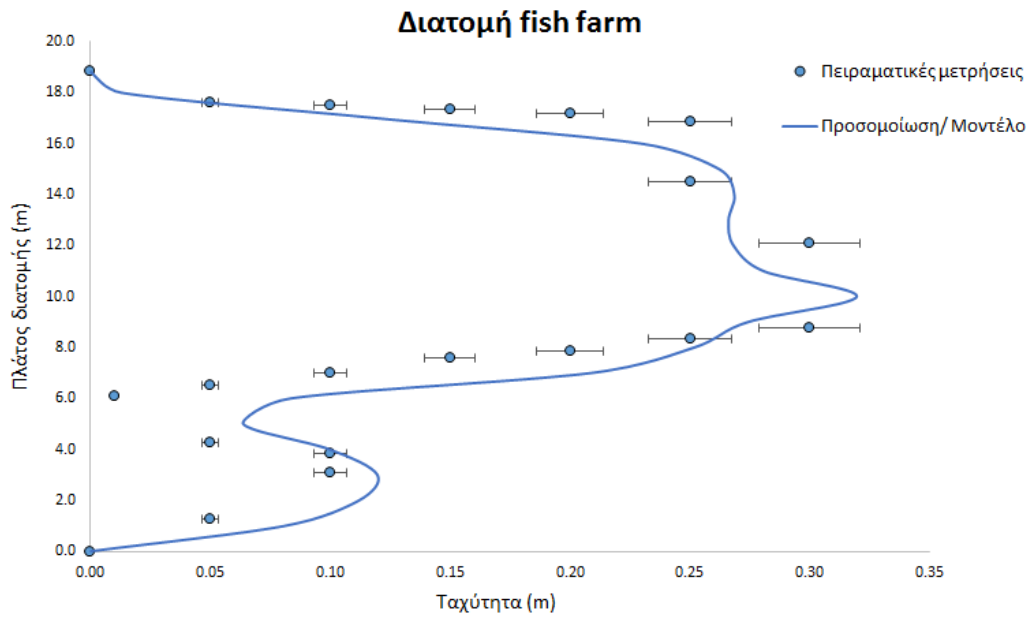
Όπου P_i η τιμή που προβλέπεται και A_i η πραγματική τιμή. Όσο πιο κοντά στο 0 είναι η τιμή του RMSE, τόσο μικρότερο σφάλμα έχουν οι τιμές μεταξύ τους.



Εικόνα 3.4-5: Προφίλ ταχυτήτων πειραματικών μετρήσεων και προσομοίωσης στη διατομή εισόδου στα ανάντη της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 3.4-1: Απόκλιση (RMSE) και συσχέτιση (IA) τιμών των προφίλ ταχυτήτων μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και της προσομοίωσης στη διατομή εισόδου στα ανάντη της περιοχής μελέτης.

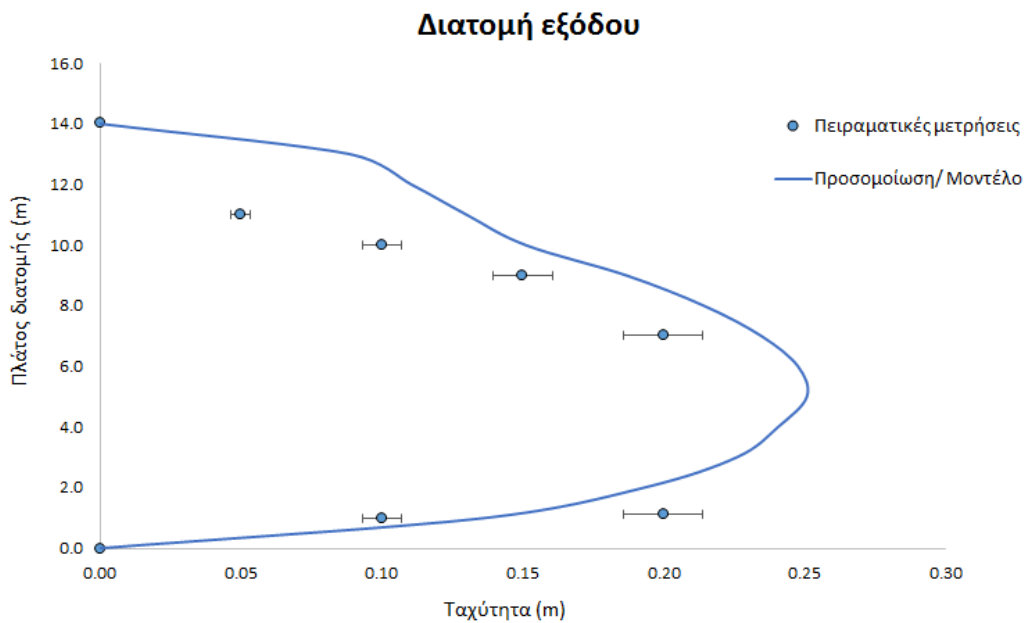
Σφάλματα (διατομή εισόδου)	
IA	0.92
RMSE	0.06



Εικόνα 3.4-6: Προφίλ ταχυτήτων πειραματικών μετρήσεων και προσομοίωσης στη διατομή εισόδου του fish farm της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 3.4-2: Απόκλιση (RMSE) και συσχέτιση (IA) τιμών των προφίλ ταχυτήτων μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και της προσομοίωσης στη διατομή της εισόδου στο fish farm της περιοχής μελέτης.

Σφάλματα (διατομή fish farm)	
IA	0.89
RMSE	0.06



Εικόνα 3.4-7: Προφίλ ταχυτήτων πειραματικών μετρήσεων και προσομοίωσης στη διατομή εξόδου στα κατάντη της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 3.4-3: Απόκλιση (RMSE) και συσχέτιση (IA) τιμών των προφίλ ταχυτήτων μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και της προσομοίωσης στη διατομή εξόδου στα κατάντη της περιοχής μελέτης.

Σφάλματα (διατομή εξόδου)	
IA	0.86
RMSE	0.07

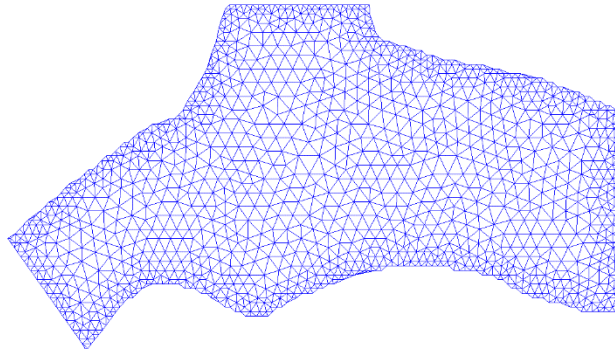
3.4.4. Ανεξαρτησία πλέγματος

Για την διασφάλιση της αντικειμενικότητας των αποτελεσμάτων κρίνεται απαραίτητη η ανεξαρτησία πλέγματος με δημιουργία όσο το δυνατόν πυκνότερων πλεγμάτων έως ότου να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματα. Κατασκευάστηκαν τρία πλέγματα με διαφορετική απόσταση μεταξύ των κόμβων ώστε να μελετηθεί το ενδεχόμενο επίδρασης τους στις προσομοιώσεις.

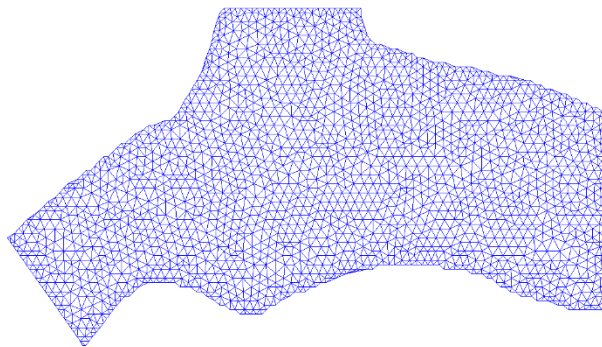
Έγιναν δοκιμές με απόσταση κόμβων 1.5m, 1.0m και 0.8m. Περαιτέρω πύκνωση του πλέγματος δεν ήταν δυνατή καθώς τα στοιχεία προκύπτουν υπερβολικά παραμορφωμένα και η προσομοίωση εμφανίζει αδυναμία εκκίνησης. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται με βάση τα προφίλ ταχυτήτων μεταξύ πειραματικών τιμών ταχύτητας νερού και τιμών προσομοίωσης στις χαρακτηριστικές διατομές.

Πίνακας 3.4-4: Χαρακτηριστικά διαφορετικών υπολογιστικών πλεγμάτων που χρησιμοποιούνται για την ανεξαρτησία πλέγματος.

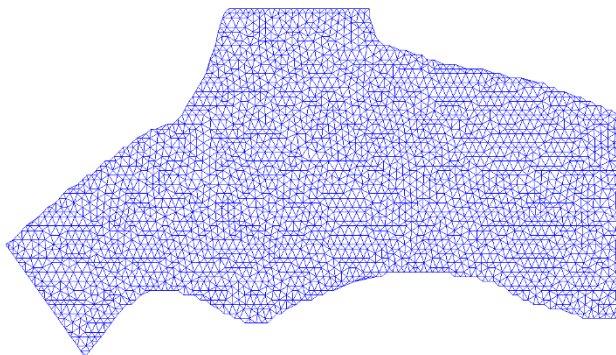
Χαρακτηριστικά υπολογιστικών πλεγμάτων			
Απόσταση κόμβων	Συνολικός αριθμός στοιχείων	Συνολικός αριθμός κόμβων	Επιφάνεια πλέγματος
1.5m	2480	1378	1527.27m ²
1.0m	3722	1999	1527.27m ²
0.8m	5298	2787	1527.27m ²



Εικόνα 3.4-8: Μη δομημένο πλέγμα με απόσταση κόμβων 1.5m

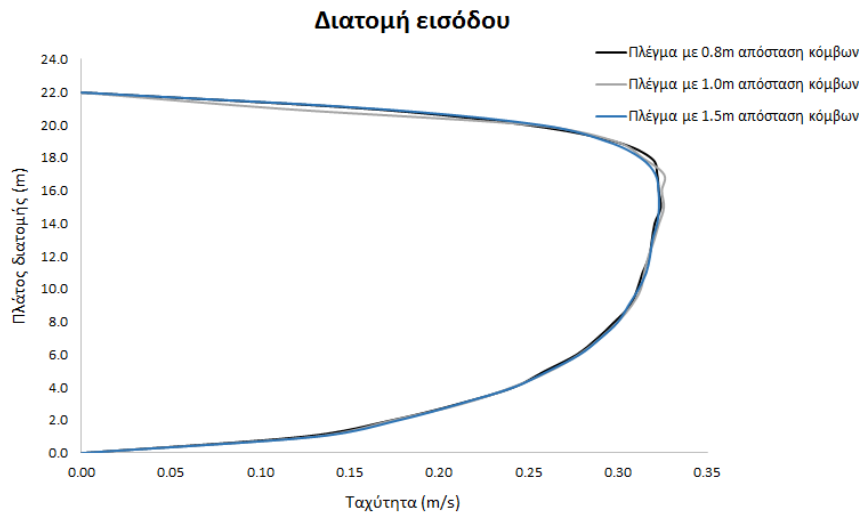


Εικόνα 3.4-9: Μη δομημένο πλέγμα με απόσταση κόμβων 1.0m



Εικόνα 3.4-10: Μη δομημένο πλέγμα με απόσταση κόμβων 0.8m

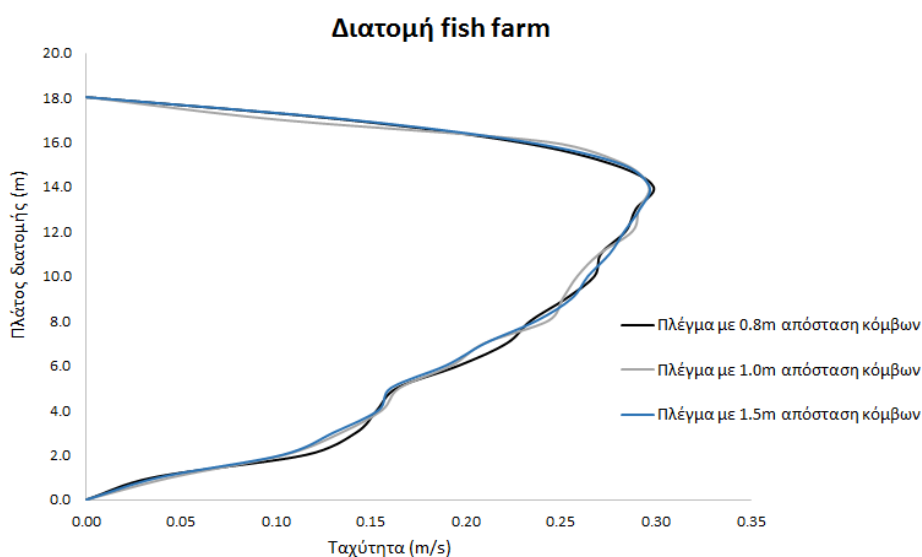
Υπολογίζεται ο δείκτης συμφωνίας IA (*index of agreement*) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE (*root mean square error*) μεταξύ του πιο πυκνού (0.8m απόσταση κόμβων) και του πιο αραιού πλέγματος (1.5m απόσταση κόμβων). Τα προφίλ ταχυτήτων στις χαρακτηριστικές διατομές μεταξύ των διαφορετικών πλεγμάτων απεικονίζονται στα γραφήματα που ακολουθούν.



Εικόνα 3.4-11: Προφίλ ταχυτήτων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις με διαφορετικά πλέγματα στη διατομή εισόδου στα ανάντη της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 3.4-5: Συσχέτιση (IA) και απόκλιση (RMSE) τιμών των προφίλ ταχυτήτων μεταξύ των διαφορετικών πλεγμάτων που χρησιμοποιούνται για την ανεξαρτησία πλέγματος στη διατομή εισόδου της περιοχής μελέτης.

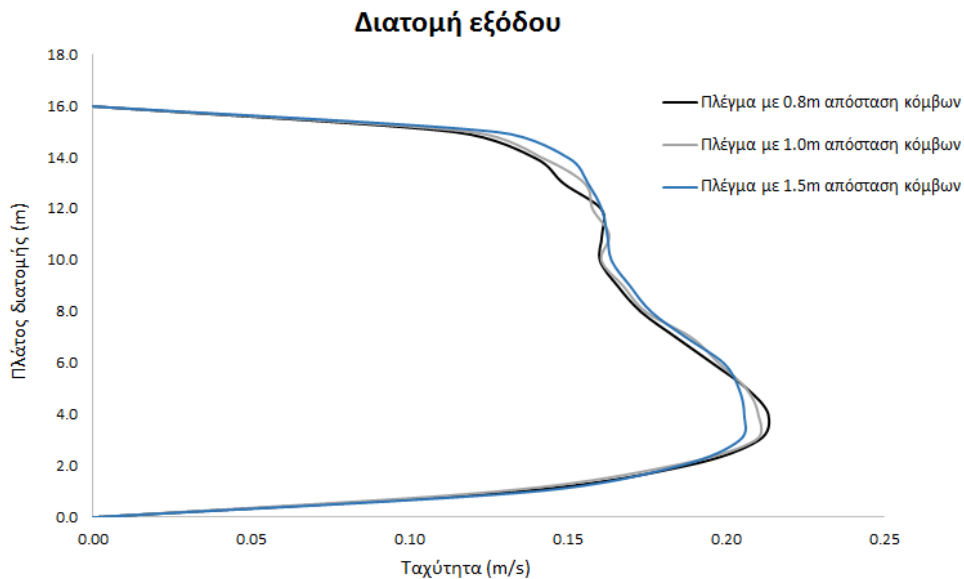
Σύγκριση μεταξύ 0.8m και 1.5m πλέγματος (διατομή εισόδου)	
IA	1.00
RMSE	0.003



Εικόνα 3.4-12: Προφίλ ταχυτήτων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις με διαφορετικά πλέγματα στη διατομή εισόδου του fish farm της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 3.4-6: Συσχέτιση (IA) και απόκλιση (RMSE) τιμών των προφίλ ταχυτήτων μεταξύ των διαφορετικών πλεγμάτων που χρησιμοποιούνται για την ανεξαρτησία πλέγματος στη διατομή εισόδου του fish farm της περιοχής μελέτης.

Σύγκριση 0.8m και 1.5m πλέγματος (διατομή fish farm)	
IA	0.97
RMSE	0.01



Εικόνα 3.4-13: Προφίλ ταχυτήτων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις με διαφορετικά πλέγματα στη διατομή εξόδου στα κατάντη της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 3.4-7: Συσχέτιση (IA) και απόκλιση (RMSE) τιμών των προφίλ ταχυτήτων μεταξύ των διαφορετικών πλεγμάτων που χρησιμοποιούνται για την ανεξαρτησία πλέγματος στη διατομή εξόδου στα κατάντη της περιοχής μελέτης.

Σύγκριση 0.8m και 1.5m πλέγματος (διατομή εξόδου)	
IA	0.95
RMSE	0.01

Τα αποτελέσματα της συσχέτισης και των αποκλίσεων σε κάθε διατομή κρίνονται πολύ ικανοποιητικά, οπότε η χρήση του πλέγματος με απόσταση κόμβων 1.5m στις υδροδυναμικές προσομοιώσεις δεν θεωρείται ότι επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα του μοντέλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΙΧΘΥΩΝ

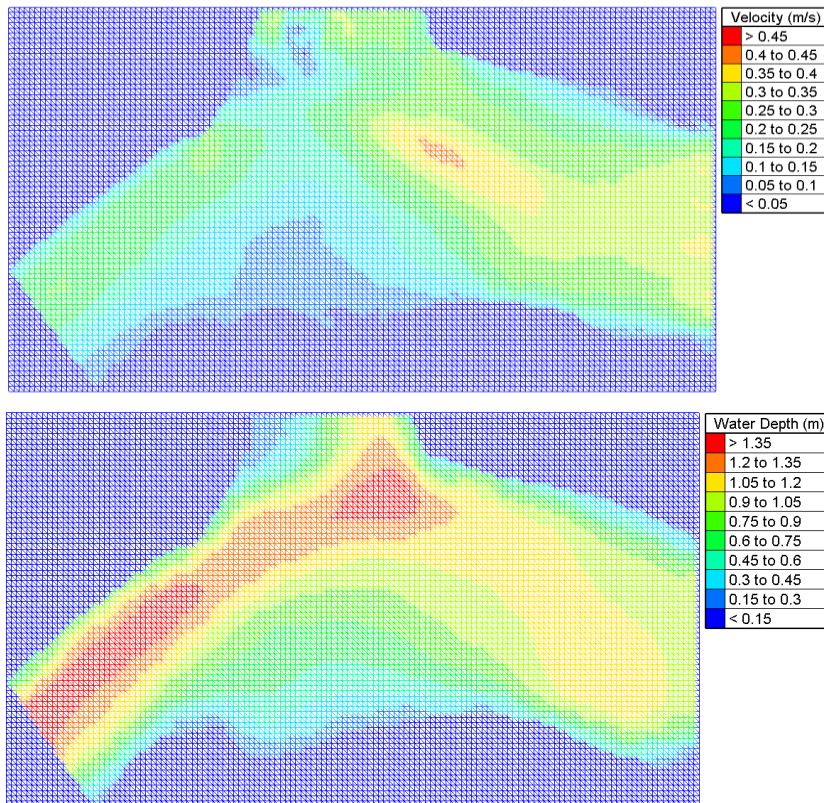
4.1. Μετατροπή υπολογιστικού μη δομημένου πλέγματος σε δομημένο πλέγμα

Για την προσομοίωση της κίνησης του ιχθύος είναι απαραίτητα τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της περιοχής, όπως οι συνιστώσες της ταχύτητας, το βάθος νερού καθώς και το υπολογιστικό πλέγμα το οποίο αντιπροσωπεύει το πεδίο ροής. Ύστερα από τις τελικές υδροδυναμικές προσομοιώσεις του μοντέλου, παρατηρήθηκε ότι η μορφή του χρησιμοποιούμενου μη δομημένου πλέγματος δυσχεραίνει την εισαγωγή των δεδομένων που αντιστοιχούν στους κόμβους στο μοντέλο ιχθύος. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε η κατασκευή ενός δομημένου πλέγματος με τη μορφή κανάβου, από το οποίο πολύ εύκολα θα εισάγονται τα στοιχεία στο πρόγραμμα.

Πίνακας 4.1-1: Χαρακτηριστικά δομημένου πλέγματος που χρησιμοποιείται για την εισαγωγή των δεδομένων (ταχύτητα και συντεταγμένες Χ,Υ κόμβων) στο μοντέλο ιχθύων.

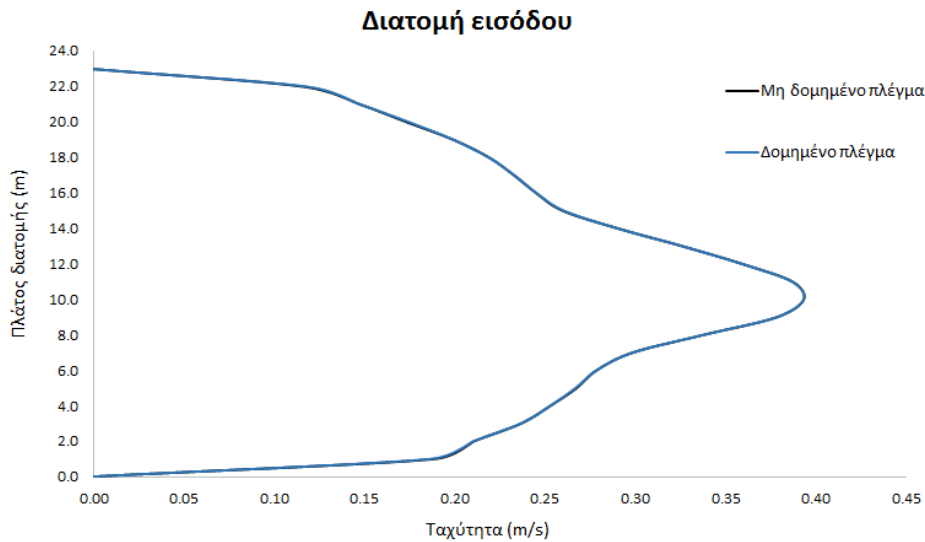
Χαρακτηριστικά δομημένου πλέγματος			
Απόσταση κόμβων	Συνολικός αριθμός στηλών	Συνολικός αριθμός γραμμών	Συνολικός αριθμός κόμβων
0.5m	135	76	10260

Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του μη δομημένου πλέγματος χρησιμοποιήθηκαν για την παρεμβολή των τιμών στους κόμβους του δομημένου κανάβου (ταχύτητα και βάθος νερού), τα οποία φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 4.1-1: Κατανομή εύρους τιμών ταχυτήτων πεδίου ροής και βάθους νερού μετά την παρεμβολή τους στους κόμβους του δομημένου πλέγματος αντίστοιχα.

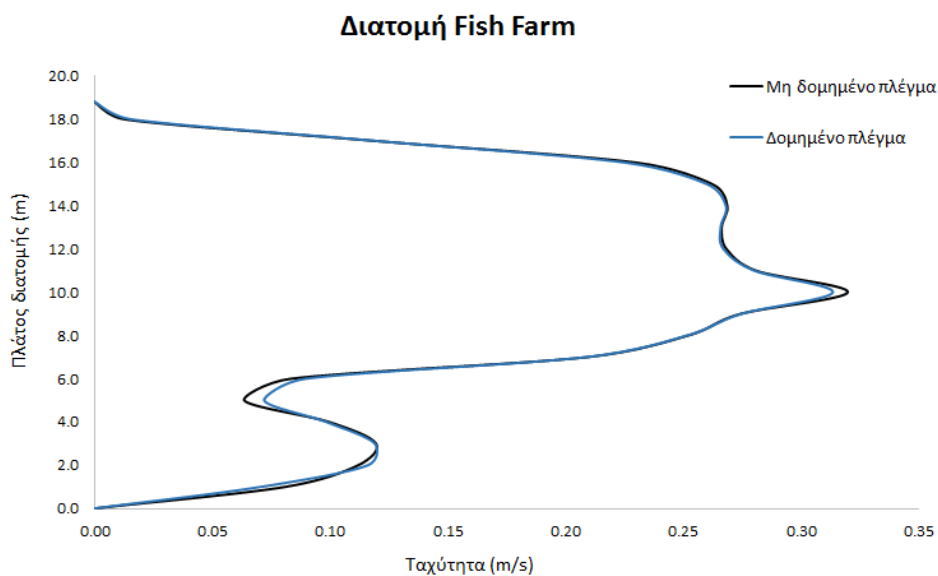
Στη συνέχεια, συγκρίνονται τα προφίλ ταχυτήτων στις χαρακτηριστικές διατομές μεταξύ του δομημένου και του μη δομημένου πλέγματος, ώστε να επιβεβαιωθεί ότι οι τιμές λόγω μετατροπής πλέγματος θα παραμείνουν σχεδόν ανεπηρέαστες. Επίσης υπολογίζονται ο δείκτης συμφωνίας IA (*index of agreement*) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE (*root mean square error*). Οι αποκλίσεις των τιμών που προκύπτουν είναι αμελητέες.



Εικόνα 4.1-2: Προφίλ ταχυτήτων μεταξύ δομημένου και μη δομημένου πλέγματος στη διατομή εισόδου ανάντη της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 4.1-2: Συσχέτιση (IA) και απόκλιση (RMSE) τιμών των προφίλ ταχυτήτων μεταξύ δομημένου και μη δομημένου πλέγματος στη διατομή εισόδου ανάντη της περιοχής μελέτης.

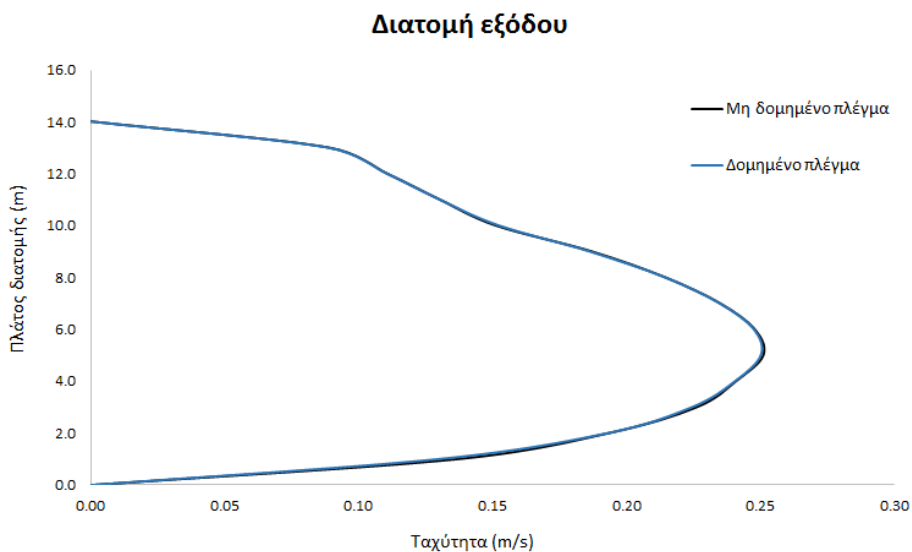
Συσχέτιση και σφάλμα τιμών (διατομή εισόδου)	
IA	1.00
RMSE	0.00



Εικόνα 4.1-3: Προφίλ ταχυτήτων μεταξύ δομημένου και μη δομημένου πλέγματος στη διατομή εισόδου στο fish farm της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 4.1-3: Συσχέτιση (IA) και απόκλιση (RMSE) τιμών των προφίλ ταχυτήτων μεταξύ δομημένου και μη δομημένου πλέγματος στη διατομή εισόδου στο fish farm της περιοχής μελέτης.

Συσχέτιση και σφάλμα τιμών (διατομή fish farm)	
IA	1.00
RMSE	0.00



Εικόνα 4.1-4: Προφίλ ταχυτήτων μεταξύ δομημένου και μη δομημένου πλέγματος στη διατομή εξόδου κατάντη της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 4.1-4: Συσχέτιση (IA) και απόκλιση (RMSE) τιμών των προφίλ ταχυτήτων μεταξύ δομημένου και μη δομημένου πλέγματος στη διατομή εξόδου κατάντη της περιοχής μελέτης.

Συσχέτιση και σφάλμα τιμών (διατομή εξόδου)	
IA	1.00
RMSE	0.00

Έχοντας ως δεδομένες τις τιμές των ταχυτήτων στους κόμβους του δομημένου πλέγματος με τη μορφή πίνακα, το μοντέλο ιχθύος είναι σε θέση να διαβάσει τις τιμές αυτές και να υπολογίσει το πεδίο των επιταχύνσεων, οι οποίες αποτελούν το κύριο ερέθισμα στην επιλογή συμπεριφοράς και κίνησης από τους ιχθύες. Οι υπολογισμοί των επιταχύνσεων καθώς και η υπόλοιπη δομή του μοντέλου ιχθύος παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

4.2. Παρουσίαση μοντέλου ιχθύος

Στο υποκεφάλαιο αυτό ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου ιχθύος που εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία και όπως αναφέρθηκε έχει βασιστεί στο μαθηματικό μοντέλο των Goodwin et al. (2014) και έχει αναπτυχθεί σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN. Στο τέλος του υποκεφαλαίου ακολουθεί το διάγραμμα ροής του προγράμματος για μία συνολική εικόνα της διαμόρφωσης του μοντέλου ιχθύος.

- 1. Εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα:** Αρχικά, εισάγεται στο μοντέλο το υπολογιστικό πλέγμα με τις τιμές των ταχυτήτων του πεδίου ροής. Το πλέγμα που χρησιμοποιείται είναι δομημένο, δισδιάστατο και αποτελείται από 10260 κόμβους. Επίσης, δίνονται οι τιμές διαφόρων παραμέτρων που είναι απαραίτητες για τη λειτουργία του μοντέλου, όπως οι παράμετροι που αναφέρονται στην κάθε συμπεριφορά. Ακόμη, δίνονται ως δεδομένα το χρονικό βήμα, ο αριθμός των επαναλήψεων και των ιχθύων, αν πρόκειται για προσομοίωση πολλών ιχθύων και χαρακτηριστικά του ιχθύος, όπως το μήκος του σώματός του, οι συντελεστές των ταχυτήτων κολύμβησης κάθε περίπτωσης (ταχύτητα έκρηξης, συνεχής και συμπάρσυρης), καθώς και η αρχική θέση εκκίνησης του ιχθύος.
- 2. Υπολογισμός των τοπικών επιταχύνσεων:** Στη συνέχεια εισάγονται τα υδροδυναμικά δεδομένα που έχουν προκύψει από τις προσομοιώσεις, τα οποία είναι το βάθος ροής, η ελεύθερη επιφάνεια και οι ταχύτητες του πεδίου ροής. Οι τοπικές επιταχύνσεις υπολογίζονται σε κάθε κόμβο του πλέγματος από τη σχέση:

$$A_M^t = \sqrt{\left(U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x}\right)^2 + \left(U \frac{\partial V}{\partial y} + V \frac{\partial U}{\partial y}\right)^2} \quad (4.1-1)$$

Όπου U , V είναι οι ταχύτητες ροής κατά τις διευθύνσεις x και y , αντίστοιχα, ενός Καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων.

Για τον υπολογισμό των κλίσεων των ταχυτήτων για κάθε κόμβο χρησιμοποιείται η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών. Στους εσωτερικούς κόμβους του πλέγματος εφαρμόζονται οι κεντρικές διαφορές, ενώ στα άκρα εφαρμόζονται οι ανάντη και κατάντη διαφορές ανάλογα με το όριο.

Κεντρικές διαφορές για τους εσωτερικούς κόμβους:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x} = \frac{U_i - U_{i-1}}{2 * DX} \quad (4.1-2)$$

Κατάντη διαφορές για τους αριστερούς κόμβους:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x} = \frac{-3 * U_i + 4 * U_{i+1} - U_{i+2}}{2 * DX} \quad (4.1-3)$$

Ανάντη διαφορές για τους δεξιούς κόμβους:

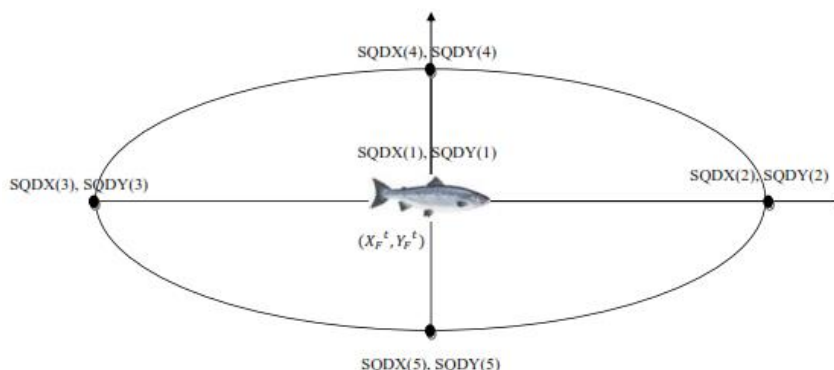
$$\frac{\partial U_i}{\partial x} = \frac{3 * U_i - 4 * U_{i-1} + U_{i-2}}{2 * DX} \quad (4.1-4)$$

Αντίστοιχα είναι και για τους όρους της εξίσωσης που αφορούν την ταχύτητα στην διεύθυνση γ. Η ένταση του μεγέθους της επιτάχυνσης που αντιλαμβάνονται οι ιχθύες προσομοιώνεται με τη λογαριθμική αδιάστατη μορφή της, όπου t είναι η χρονική στιγμή υπολογισμού:

$$I_A^t = \log_{10} \frac{A_M^t}{A_0} \quad (4.1-5)$$

Όπου A_0 έχει μία σταθερή τιμή αναφοράς.

- 3. Υπολογισμός της περιοχής αντίληψης του ιχθύος:** Κατά την έναρξη της χρονικής επανάληψης που περιλαμβάνεται μέσα στην επανάληψη του ιχθύος, προσδιορίζεται η θέση του ιχθύος ως προς τους εγγύτερους κόμβους μέσα στο πλέγμα, όπου ο εγγύτερος κόμβος επιλέγεται. Στη συνέχεια προσδιορίζεται η περιοχή αντίληψης εντός της οποίας ο ιχθύς αντιλαμβάνεται το υδροδυναμικό ερέθισμα. Αποτελείται από 5 θέσεις αισθητήρων, εκ των οποίων η πρώτη είναι το κέντρο του ιχθύος με συντεταγμένες X και Y, δύο στην διεύθυνση του X και δύο στην διεύθυνση του Y και οι υπόλοιπες γύρω από τον ιχθύ, όπως φαίνονται στην παρακάτω εικόνα. Οι αποστάσεις των θέσεων αισθητήρων υπολογίζονται αρχικά στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων με αρχή το κέντρο του ιχθύος και τη διεύθυνσή του. Στη συνέχεια ανάγονται με την εφαρμογή μητρώου στροφής-μετατόπισης στο Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων του πεδίου ροής.



Εικόνα 4.2-1: Περιοχή αντίληψης ιχθύος (*sensory ovoid*).

Ο υπολογισμός των θέσεων των αισθητήρων ($SQD_{x,y}$) περιλαμβάνει την απόσταση ή τη μετατόπιση του σημείου αισθητήρα ($SPDIST$), την τυχαία αύξηση της απόστασης του σημείου αισθητήρα ($RINC$) και λευκό θόρυβο στα σημεία αισθητήρων από την προσθήκη εύρους διαφοροποίησης σε δευτερεύοντα σημεία (RND) και έχει ως εξής:

$$SPDIST = \frac{ncoeff}{I_A} = \frac{ncoeff}{\log_{10} \frac{A_M}{A_0}} \quad (4.1-6)$$

$$RINC = 1 + RRSQD * Delta \quad (4.1-7)$$

$$RND = (2 * RRSQD - 1) * coeff_{40} \quad (4.1-8)$$

$$SQD_{x,y} = \pm SPDIST * RINC \text{ ή } SQD_{x,y} = \pm SPDIST * RND \quad (4.1-9)$$

Όπου με $RRSQD$ συμβολίζεται το τυχαίο νούμερο που παράγεται από συνεχή κατανομή με τιμές 0-1, με $coeff_{40}$ ένας συντελεστής που αφορά την κλίμακα της

ελάχιστης απόστασης των σημείων αισθητήρων ως προς την επιτάχυνση που παίρνει τιμές από 0 έως 10 και στην προσομοιώσεις παίρνει την τιμή 4.5, με $\log_{10} \frac{A_M}{A_0}$ το μέγεθος της επιτάχυνσης που αντιστοιχίζεται ανάλογα στην κλίμακα decibel όπου A_M η ελάχιστη τιμή που επηρεάζει το μέγεθος της περιοχής αντίληψης και ισούται με $0.0001 m/s^2$ και A_0 επιτάχυνση με αυθαίρετη τιμή αναφοράς ίση με 10^{-6} , με Δ το ποσοστό της τυχαίας αύξησης της απόστασης των θέσεων αισθητήρων που έχει εύρος τιμής από 0.1 έως 3 και στις προσομοιώσεις ισούται με 2. Αντίστοιχα, οι θέσεις των αισθητήρων προσδιορίζονται ως προς τους εγγύτερους κόμβους, όπου επιλέγονται και πάλι οι εγγύτεροι κόμβοι.

- 4. Καθορισμός βασικής συμπεριφοράς:** Για την επιλογή συμπεριφοράς από τον ιχθύ κάθε χρονική στιγμή είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του δείκτη ανίχνευσης και του συντελεστή απόφασης. Ο δείκτης ανίχνευσης (*detection metric*), ο οποίος βασίζεται στην 'μόλις αισθητή διαφορά' του Weber δίνεται από τον τύπο:

$$Detection\ Metric = \frac{I^t - I_a^t}{I_a^t} \quad (4.1-10)$$

Όπου $I^t = \log_{10} \frac{A_M^t}{A_0}$ (4.1-5) και

$$I_a^t = (1 - m_{acclimatization}) * I^t + m_{acclimatization} * I_a^t * (t - 1) \quad (4.1-11).$$

I^t είναι το μέγεθος της επιτάχυνσης που αντιλαμβάνεται ο ιχθύς την χρονική στιγμή t , I_a^t είναι το μέγεθος της επιτάχυνσης που έχει εγκλιματιστεί ο ιχθύς, $m_{acclimatization}$ είναι ο συντελεστής μνήμης που δείχνει πόσο γρήγορα ο ιχθύς εγκλιματίζεται σε νέες εντάσεις του ερεθίσματος, δηλαδή της επιτάχυνσης και έχει εύρος τιμών 0-1 και A_M^t όπως αναφέρθηκε, το μέγεθος της επιτάχυνσης της ροής. Αν ο δείκτης ανίχνευσης προκύπτει μεγαλύτερος ή ίσος από την τιμή κατώφλιου που έχει οριστεί για κάθε συμπεριφορά (B2-B3), τότε σημειώνεται γεγονός:

$$D.Metric = \frac{I^t - I_a^t}{I_a^t} \geq k_i (\text{κατώφλι} - \text{threshold}) \rightarrow E^t \text{ γεγονός (event)}$$

Η συμπεριφορά B1 έχει τιμή κατώφλιου 0.0 οπότε θεωρείται προκαθορισμένη συμπεριφορά για τους ιχθύες. Προφανώς όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή του k_i , τόσο πιο δύσκολο είναι να σημειωθεί γεγονός για την αντίστοιχη συμπεριφορά. Το γεγονός E^t λαμβάνει τιμές μέσω του τύπου δεδομένου αλήθειας Boolean, δηλαδή παίρνει την τιμή 1 αν ο δείκτης ανίχνευσης ξεπεράσει το κατώφλι και την τιμή 0 αν συμβαίνει το αντίθετο (*Boolean event*).

Αφού λοιπόν έχει σημειωθεί γεγονός, απαραίτητος είναι ο υπολογισμός του συντελεστή απόφασης από τον οποίο καθορίζεται ποια συμπεριφορά θα ακολουθήσει ο ιχθύς. Χρησιμοποιείται μία πιθανοτική προσέγγιση ώστε να προσομοιωθεί πως ο ιχθύς αλλάζει από τη μία συμπεριφορά στην άλλη. Υπολογίζεται η αναμενόμενη χρησιμότητα U^t από την πιθανότητα P^t να αποκτηθεί η χρησιμότητα u_i αντίστοιχη για κάθε συμπεριφορά. Η πιθανότητα προτίμησης της κάθε συμπεριφοράς είναι:

$$P_B^t = (1 - m_{mem}) * E^t + m_{mem} * P_B^t * (t - 1) \quad (4.1-12)$$

Όπου m_{mem} είναι ο συντελεστής μνήμης για κάθε συμπεριφορά που ενσωματώνει την ποσότητα πληροφορίας του προηγούμενου χρονικού βήματος στην επόμενη απόφαση ακολουθώντας την αντίληψη ότι η διάρκεια ή η ένταση της δραστηριότητας στους αισθητήριους νευρώνες του ιχθύος χρειάζεται να περάσει ένα κατώφλι, μια κατώτατη τιμή για να γίνει αντιληπτή.

Ο συντελεστής απόφασης βασίζεται σε μία αντικειμενική λειτουργία, την χρησιμότητα, όπου κάθε συμπεριφορά έχει μία σχετική με αυτήν χρησιμότητα. Η υιοθετημένη συμπεριφορά θα είναι τελικά αυτή που παρέχει τη μέγιστη αναμενόμενη χρησιμότητα U^t :

$$U_B^t = P_B^t * u_B^t \quad (4.1-13)$$

Όπου u_B^t είναι η υποκειμενική τιμή της χρησιμότητας ή η εγγενής προτίμηση επιλογής για κάθε συμπεριφορά και έχει εύρος τιμών 0-1. Τελικά, σε κάθε χρονική στιγμή t η συμπεριφορά με τη μέγιστη χρησιμότητα U_B^t ενεργοποιείται.

Όταν δηλαδή ισχύει $U^t = U_{max}^t \xrightarrow{\text{τότε}} Decision_{B1,B2,B3} = 1$. Κάθε φορά που αποφασίζεται μία συμπεριφορά ο συντελεστής απόφασης αυξάνεται κατά 1 μονάδα ώστε στο τέλος των προσομοιώσεων να είναι γνωστό πόσες φορές ακολουθήθηκε μία συμπεριφορά.

- 5. Υπολογισμός των συνιστωσών U_F , V_F της ταχύτητας κίνησης του ιχθύος κατά x και y , αντίστοιχα:** Ανάλογα με το ποια συμπεριφορά έχει επιλεχθεί υπολογίζονται η ταχύτητα του ιχθύος όπου λαμβάνεται υπόψη το μήκος του ιχθύος (L_f) και οι συντελεστές των ταχυτήτων κολύμβησης κάθε περίπτωσης (ταχύτητα έκρηξης, συνεχής S_{cruise} και συμπαρασύρσης S_{drift}) και η γωνία του ιχθύος ως προς X,Y ($FishangleXY$) που προκύπτει από τις γωνίες του διανύσματος της ροής ($FlowangleXY$) και της γωνίας μεταβολής της κίνησης του ιχθύος ως προς X,Y ($angleXY$) σε σχέση με το διάνυσμα της ροής.

Αρχικά, υπολογίζεται η γωνία του διανύσματος της ροής, δηλαδή η κατεύθυνση της ταχύτητας ροής ($FlowangleXY$), με συνιστώσες (U^t, V^t) στην θέση του ιχθύος (X_F^t, Y_F^t): $FlowangleXY^t = \tan^{-1} \left(\frac{V^t}{U^t} \right)$ (4.1-14). Επίσης, για $t = 0$ $angleXY^t = 0$ και $FishangleXY^t = 0$.

Συμπεριφορά B1:

$$Speedfish^t = L_F * \left(S_{cruise} * (S_{cruise} - S_{drift}) \right) \quad (4.1-15)$$

Συμπεριφορά B2:

$$Speedfish^t = L_F * \left(S_{cruise} + RR * (S_{cruise} - S_{drift}) \right), \text{ αν } A_M^t - A_M^{t-dt} < 0 \quad (4.1-16)$$

Όπου RR τυχαίος αριθμός από συνεχή κατανομή με εύρος [0-1].

$$Speedfish^t = \sqrt{U^2 + V^2} * (1 + 1.5), \text{ αν } A_M^t - A_M^{t-dt} \geq 0 \quad (4.1-17)$$

Συμπεριφορά B3:

$$Speedfish^t = L_F * S_{boost}, \text{ αν } Decision = 1 \quad (4.1-18)$$

$$Speedfish^t = Speedfish^{t-dt} * (1 - 0.025), \text{ αν } Decision > 1 \quad (4.1-19)$$

Τελικά οι συνιστώσες της ταχύτητας U_F , V_F του ιχθύος κάθε χρονική στιγμή t θα είναι:

$$U_F^t temp = Speedfish^t * \cos(angleXY^t) \quad (4.1-20)$$

$$V_F^t temp = Speedfish^t * \sin(angleXY^t) \quad (4.1-21)$$

$$U_F^t = U_F^t temp * \cos(FishangleXY^t) - V_F^t temp * \sin(FishangleXY^t) \quad (4.1-22)$$

$$V_F^t = U_F^t temp * \sin(FishangleXY^t) + V_F^t temp * \cos(FishangleXY^t) \quad (4.1-23)$$

6. **Υπολογισμός της νέας θέσης του ιχθύος X_F, Y_F και κατεύθυνσης του ιχθύος:** Η νέα θέση υπολογίζεται με βάση την προηγούμενη θέση του ιχθύος από την παρακάτω εξίσωση. Ο εκθέτης $t+dt$ δείχνει τον υπολογισμό του σχετικού μεγέθους την τελική χρονική στιγμή του κάθε χρονικού διαστήματος των υπολογισμών.

$$X_F^{t+dt} = X_F^t + (U_F^t + U^t) * dt \quad (4.1-24)$$

$$Y_F^{t+dt} = Y_F^t + (V_F^t + V^t) * dt \quad (4.1-25)$$

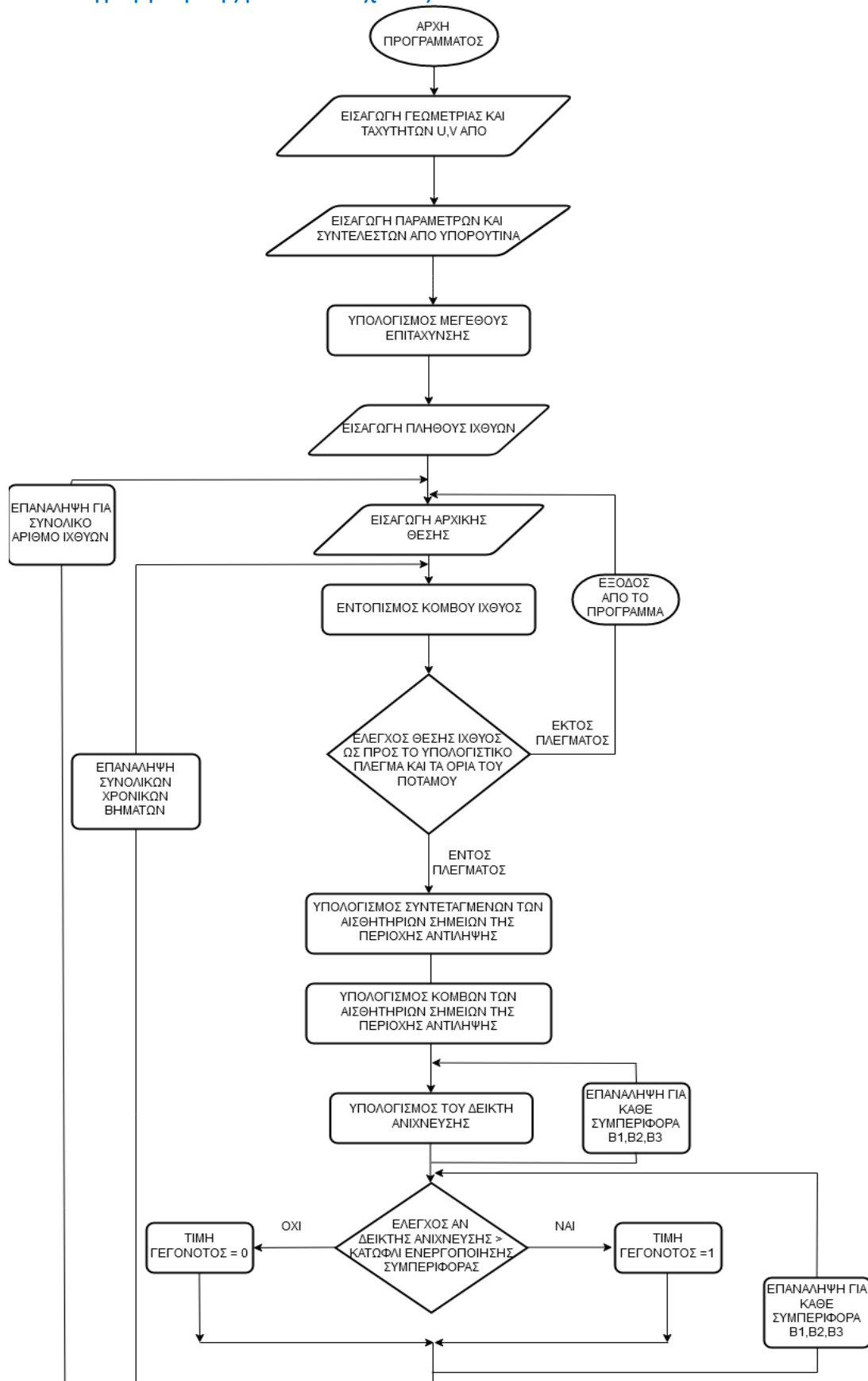
$$FishangleXY^{t+dt} = FishangleXY^t + angleXY^t \quad (4.1-26)$$

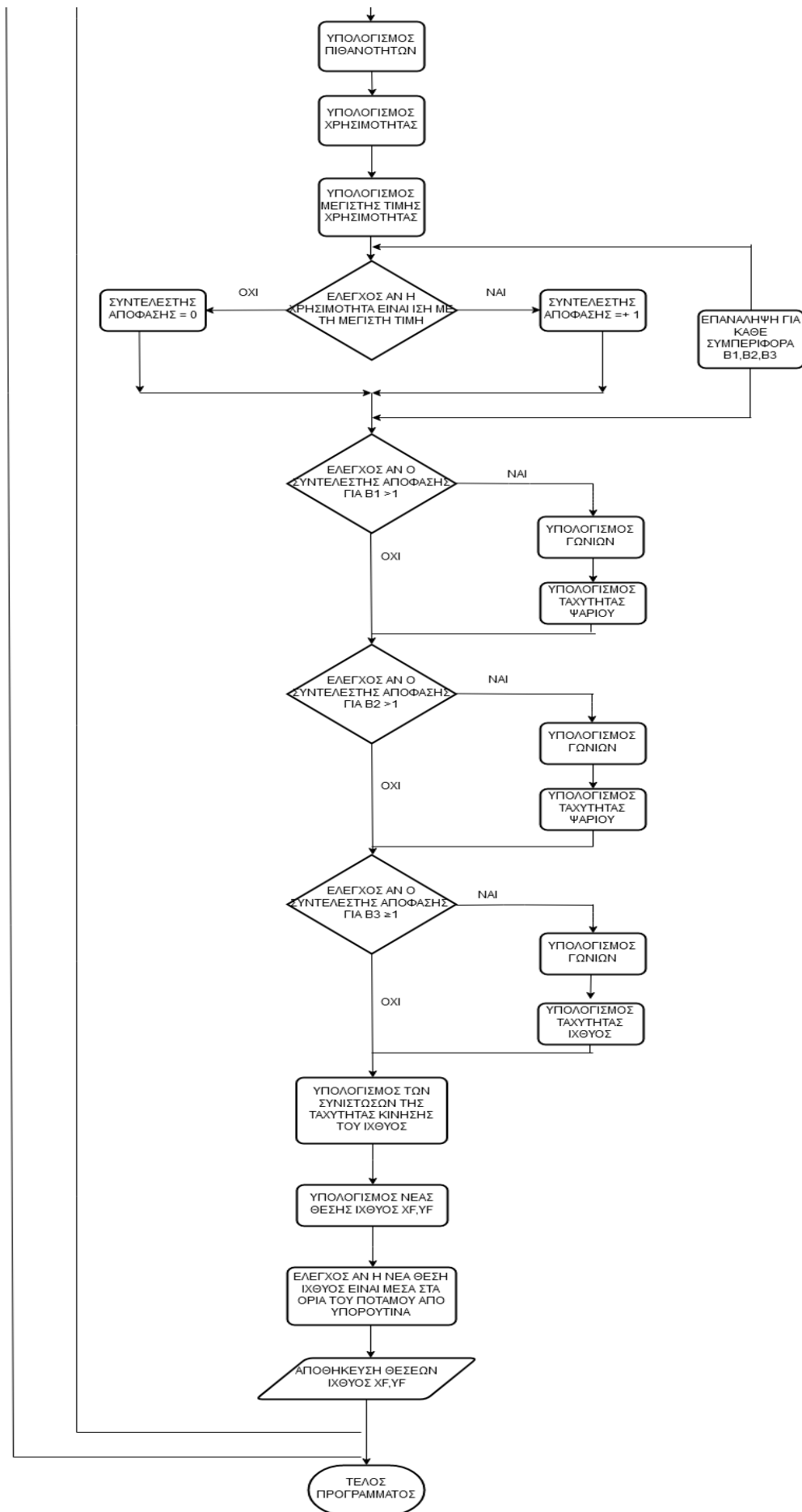
7. **Έλεγχος θέση ιχθύος ως προς τα όρια του ποταμού και το υπολογιστικό πλέγμα:** Αφού έχει υπολογιστεί η νέα θέση του ιχθύος, το μοντέλο ελέγχει αν η θέση αυτή είναι μέσα στα όρια του ποταμού καθώς και του υπολογιστικού πλέγματος. Διαφορετικά αν η θέση είναι εκτός των ορίων του ποταμού ή του πλέγματος το πρόγραμμα διακόπτεται και εμφανίζει το αντίστοιχο μήνυμα στον χρήστη. Πραγματοποιείται ο έλεγχος αυτός καθώς κατά την προσομοίωση διαπιστώθηκε ότι ο ιχθύς μπορούσε να επιλέξει θέση εκτός των ορίων του ποταμού και πρακτικά να φαίνεται ότι περνάει στην όχθη. Για τον λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκαν κάποιες αλλαγές στο μοντέλο. Πιο συγκεκριμένα, δομήθηκε μία υπορουτίνα που υπολογίζει με βάση τη θέση του ιχθύ τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές των X_F, Y_F που επιτρέπεται να κινηθεί ο ιχθύς. Οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές προκύπτουν με βάση την θέση του ιχθύ, δηλαδή ανάμεσα σε ποιες οριακές συνθήκες βρίσκονται τα X_F, Y_F . Στην περίπτωση που η θέση του ιχθύος υπολογίζεται εκτός των ορίων του ποταμού τότε ο ιχθύς παραμένει στην ίδια θέση, δηλαδή η νέα θέση παραμένει ίδια με την προηγούμενη, έως ότου η νέα θέση του ιχθύ ικανοποιεί τις συνθήκες και παραμένει μέσα στα όρια του ποταμού.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο έχουν ως εξής:

- Ένα αρχείο στο οποίο αποθηκεύονται πόσες φορές έχει επιλεγεί η κάθε συμπεριφορά από τον ιχθύ και
- Ένα αρχείο με τις θέσεις X και Y του ιχθύος σε κάθε χρονικό βήμα σε συντεταγμένες UTM, όπως έχει δοθεί και όλη η περιοχή. Το αρχείο αυτό στη συνέχεια εισάγεται στο πρόγραμμα υπολογιστικών φύλλων Excel και πολύ εύκολα αναπαρίσταται η τροχιά του ιχθύ σε διάγραμμα.

4.3. Διάγραμμα ροής μοντέλου ιχθύος

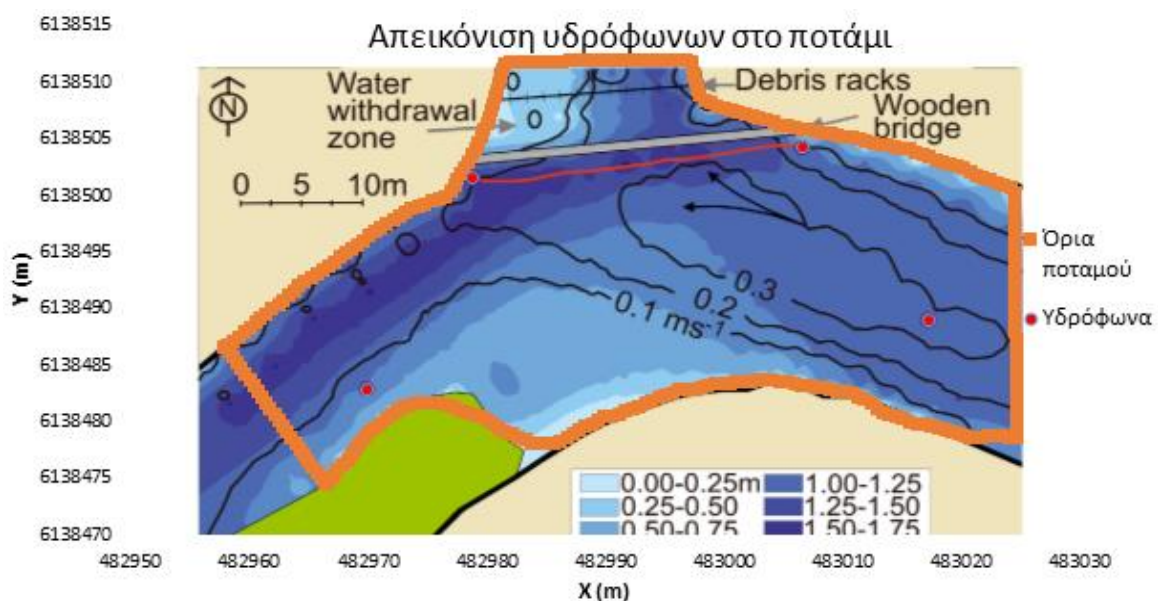




4.4. Επεξεργασία πειραματικών τροχιών ιχθύων στο πεδίο

Οι τροχιές των μελετώμενων ιχθύων καταγράφηκαν με τη χρήση υδροφώνων που ήταν διατεταγμένα σε τέτοιες θέσεις ώστε να σχηματίζουν μορφή τραπεζίου κατά μήκος και κατά πλάτος του ποταμού. Πιο συγκεκριμένα, όπως αναφέρεται στη δημοσίευση των Svendsen et al. (2011), τοποθετήθηκαν επάνω στους μελετώμενους ιχθύες ακουστικοί πομποί και αφήνονταν ελεύθεροι. Κάθε φορά που περνούσαν από την περιοχή που κάλυπτε η διάταξη των υδρόφωνων, ο ακουστικός πομπός έδινε σήμα και οι τροχιές καταγράφονταν με τη μορφή συντεταγμένων X και Y. Τα χαρακτηριστικά των ιχθύων που συμμετείχαν στις πειραματικές μετρήσεις ήταν τα εξής: μήκος $19.1 \pm 1.1 \text{ cm}$ και βάρος $53.1 \pm 9.9 \text{ g}$. Κατά την της περιοχής μελέτης είχε τοποθετηθεί μία παγίδα τύπου Wolf, στην οποία παγιδεύονταν οι εξεταζόμενοι ιχθύες, ώστε να γνωρίζουν οι μελετητές πόσοι ιχθύες από το σύνολο συνέχισαν την κατάντη μετανάστευσή τους.

Οι θέσεις των υδροφώνων δόθηκαν αρχικά σε σύστημα συντεταγμένων το οποίο ήταν άγνωστο και από τον ίδιο τον μελετητή, με τη μόνη όμως πληροφορία ότι οι συντεταγμένες αυτές είναι σε πόδια (ft). Οπότε οι θέσεις των υδροφώνων μετατρέπονται από ft σε m με την αναλογία $\frac{1 \text{ ft}}{1 \text{ m}} = 0.3048$. Για τη μετατροπή τους στο σύστημα UTM χρησιμοποιήθηκαν τα στερεά όρια του ποταμού σε συνδυασμό με την απεικόνιση του ποταμού από τη δημοσίευση. Ουσιαστικά έγινε εισαγωγή των οριακών σημείων της περιοχής μελέτης (πορτοκαλί σημεία) στην εικόνα του ποταμού και με τη βοήθεια του προγράμματος Excel καθορίστηκαν οι συντεταγμένες των υδροφώνων (κόκκινα σημεία) στο σύστημα UTM.



Εικόνα 4.4-1: Απεικόνιση υδρόφωνων στο ποτάμι. Τα υδρόφωνα φαίνονται με τις κόκκινες κουκίδες.

Οι θέσεις λοιπόν, των υδρόφωνων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα πριν και μετά τη μετατροπή τους στο σύστημα συντεταγμένων UTM.

Πίνακας 4.4-2: Μετατροπή συντεταγμένων των υδροφώνων που βρίσκονται στο ποτάμι. Οι θέσεις ως προς την απεικόνιση αναφέρονται στις κόκκινες κουκίδες που φαίνονται στην εικόνα 4.4-1. Στις πρώτες 4 γραμμές οι συντεταγμένες στην αρχική τους μορφή (μετά τον υπολογισμό από ft σε m) και η μετατροπή τους σε UTM στις 4 τελευταίες γραμμές.

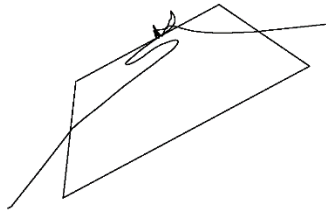
ΥΔΡΟΦΩΝΑ			
Θέσεις υδροφώνων ως προς την απεικόνιση	α/α	X (m)	Y (m)
πάνω αριστερά	1	6232566.49	1390317.40
πάνω δεξιά	2	6232588.90	1390330.45
κάτω αριστερά	3	6232564.51	1390297.65
κάτω δεξιά	4	6232603.07	1390319.99
Μετατροπή σε UTM			
πάνω αριστερά	1	482978.90	6138501.50
πάνω δεξιά	2	483006.70	6138504.20
κάτω αριστερά	3	482970.00	6138482.80
κάτω δεξιά	4	483017.30	6138489.00

Από τη στιγμή που έχει γίνει αντιστοίχιση των θέσεων των υδροφώνων από το ένα σύστημα στο άλλο, είναι εφικτή πια η μετατροπή των συντεταγμένων X, Y των τροχιών που ακολούθησαν οι ιχθύες, από το άγνωστο σύστημα που καταγράφουν τα υδρόφωνα σε σύστημα συντεταγμένων UTM, διότι οι θέσεις τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση αναφοράς από το ένα σύστημα στο άλλο.

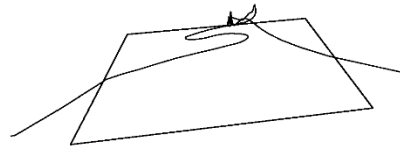
Για τη μετατροπή αυτή εφαρμόζεται γεωγραφική προσαρμογή. Με τη βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος *AutoCAD* η γεωγραφική προσαρμογή γίνεται με την εφαρμογή του ομοπαράλληλου ή αφινικού (affine) μετασχηματισμού. Εισάγονται στο πρόγραμμα οι 4 θέσεις των υδροφώνων πριν και μετά τη μετατροπή τους στο σύστημα UTM. Ακόμη, εισάγεται η πειραματική τροχιά που μετασχηματίζεται κάθε φορά σε σημεία X και Y που ενώνονται σε μία γραμμή (polyline). Ανοίγουμε το εργαλείο του προγράμματος που εφαρμόζει τον αφινικό μετασχηματισμό και επιλέγουμε ως αντικείμενο του μετασχηματισμού την γραμμή της τροχιάς. Ως σημεία αναφοράς επιλέγονται οι αρχικές θέσεις των υδροφώνων πριν τη μετατροπή και τελικά σημεία για τον μετασχηματισμό της τροχιάς επιλέγονται οι θέσεις των υδροφώνων στο σύστημα UTM. Η τροχιά αμέσως μετασχηματίζεται και τα νέα σημεία X και Y εξάγονται σε αρχείο txt, τα οποία πολύ εύκολα μπορούν πια να απεικονιστούν μέσα στα όρια της περιοχής μελέτης.

Στην εικόνα που ακολουθεί (4.4-2) φαίνεται στα αριστερά το τραπέζιο που σχηματίζουν τα 4 υδρόφωνα στο άγνωστο σύστημα συντεταγμένων με μία πειραματική τροχιά ιχθύος και στα δεξιά το τραπέζιο των υδροφώνων που έχουν μετατραπεί, καθώς και η ίδια πειραματική τροχιά ως τελικό αποτέλεσμα του μετασχηματισμού.

ΠΡΙΝ ΤΟΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ



ΜΕΤΑ ΤΟΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ



Εικόνα 4.4-2: Αριστερά είναι το τραπέζιο των υδροφώνων στις άγνωστες συντεταγμένες και μία πειραματική τροχιά ιχθύος αντίστοιχα και δεξιά το τραπέζιο και η τροχιά μετά τον αφινικό μετασχηματισμό.

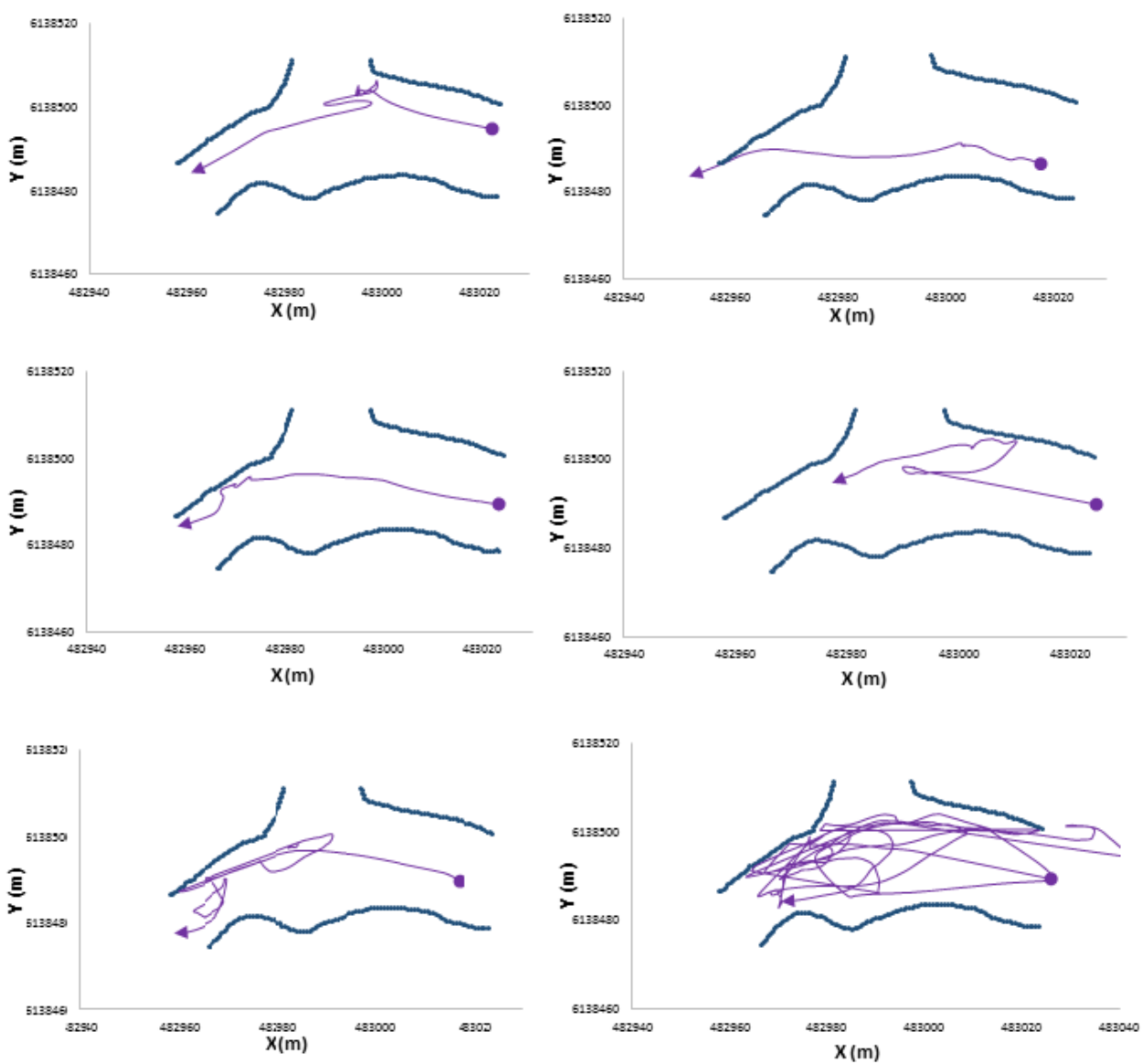
Όσον αφορά το θεωρητικό υπόβαθρο, η γεωγραφική προσαρμογή υλοποιείται με την χρήση βοηθητικών σημείων για τα οποία είναι γνωστές οι συντεταγμένες και στα δύο συστήματα. Για την εφαρμογή του ομοπαράλληλου μετασχηματισμού (affine transformation), ο οποίος έχει έξι (6) άγνωστες παραμέτρους, απαιτούνται τουλάχιστον τρία (3) μη συνευθειακά σημεία. Ο μετασχηματισμός υλοποιείται με βάση σύστημα γραμμικών εξισώσεων, το οποίο έχει τη γενική μορφή:

$$X = ax + by + c \quad (4.4-1)$$

$$Y = dx + ey + f \quad (4.4-2)$$

Στις εξισώσεις αυτές, άγνωστες είναι οι παράμετροι a, b, c, d, e, f ενώ οι καρτεσιανές συντεταγμένες των σημείων γεωγραφικής προσαρμογής στο σύστημα αναφοράς του χάρτη (X, Y) και στο τοπικό σύστημα του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου περιβάλλοντος μετασχηματισμού (x, y) είναι γνωστές (Τσούλος, Λ., Σκοπελίτη Α., Στάμου Λ., 2015).

Από το σύνολο των 52 τροχιών που δόθηκαν ήταν δυνατό να επεξεργαστούν οι 42 τροχιές, καθώς ο μεγάλος και μη διαχειρίσιμος όγκος πληροφορίας των υπολοίπων (πάνω από 10.000 σημεία X, Y) δεν το επέτρεψε. Ακολουθούν ενδεικτικά μερικές πειραματικές τροχιές ιχθύων μετά τον μετασχηματισμό.



Εικόνα 4.4-3: Πειραματικές τροχιές ιχθύων όπως προκύπτουν μετά τον μετασχηματισμό των συντεταγμένων τους. Η κουκκίδα συμβολίζει την θέση εκκίνησης και το βέλος την τελευταία θέση του ιχθύος.

4.5. Δείκτες καταλληλότητας ενδιαιτήματος ιχθύος

4.5.1. Καμπύλες καταλληλότητας Ατλαντικού Σολομού από βιβλιογραφία

Ο σκοπός των δεικτών καταλληλότητας ενός ενδιαιτήματος (*habitat suitability index*) είναι να υποδείξουν ποιες συνθήκες υποστρώματος, βάθους και ταχύτητας νερού είναι οι ιδανικές για το κάθε είδος ιχθύων. Ο δείκτης καταλληλότητας (*suitability index*) παίρνει τιμές από 0 έως 1, με την τιμή 1 να είναι η καλύτερη δυνατή συνθήκη.

Η εφαρμογή των δεικτών καταλληλότητας στην περιοχή μελέτης έχει σκοπό την διερεύνηση της καταλληλότητας της περιοχής για το είδος του Ατλαντικού Σολομού και κυρίως για την νεαρή ηλικία που βρίσκονται οι μελετώμενοι ιχθύες. Το στάδιο της νεαρής ηλικίας που αναφέρεται ως *smolt* είναι πριν το στάδιο της ενηλικίωσης των ιχθύων. Οι Σολομοί μεγέθους *smolt* μεγαλώνουν καθ' όλη τη διάρκεια της κατάντη μετανάστευσης τους προς την θάλασσα έως ότου ενηλικιωθούν και είναι έτοιμοι για αναπαραγωγή. Στη διεθνή βιβλιογραφία δεν παρέχονται δεδομένα για το μέγεθος *smolt* του Ατλαντικού Σολομού, ώστε να δημιουργηθούν οι αντίστοιχες καμπύλες καταλληλότητας. Για το λόγο αυτό, κατασκευάστηκαν πρώτα οι καμπύλες καταλληλότητας για το στάδιο του μικρού (*parr*) και του ενήλικου (*adult*) Σολομού, οι οποίες είναι διαθέσιμες στην βιβλιογραφία, ώστε να δούμε που κινούνται οι προτιμήσεις τους ανάλογα με την κατάσταση που επικρατεί στην περιοχή μελέτης. Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν οι καμπύλες καταλληλότητας για την περιοχή μελέτης με βάση τα δεδομένα που έχουμε από το υδροδυναμικό μοντέλο (τραχύτητα πυθμένα, βάθος και ταχύτητα νερού), ώστε να υπάρχει εικόνα για τις προτιμήσεις του νεαρού Σολομού (*smolt*) και να εξεταστεί εάν βρίσκονται ενδιάμεσα του μικρού και του ενήλικου και τείνουν κυρίως προς του ενήλικου.

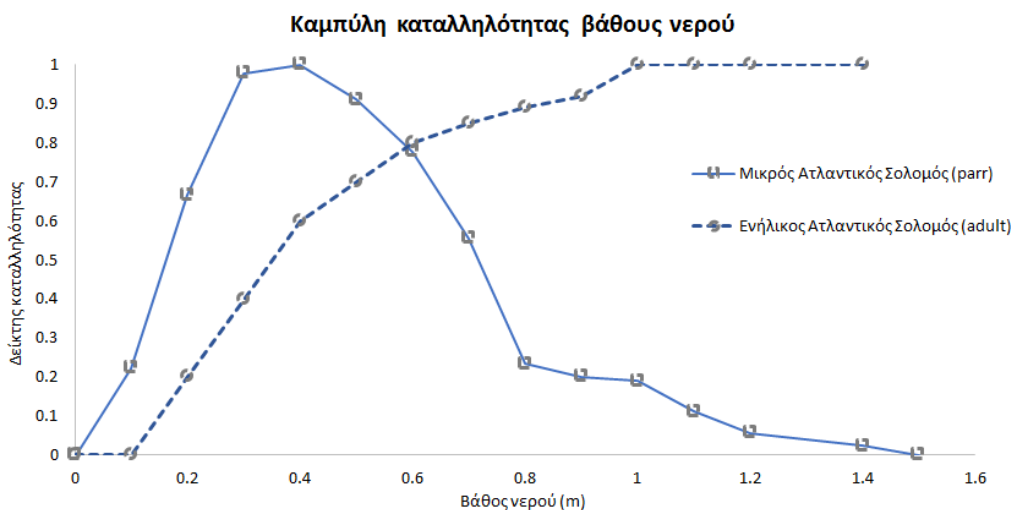
Οι καμπύλες καταλληλότητας για τον μικρό και ενήλικο Σολομό που ακολουθούν χρησιμοποιήθηκαν από την βιβλιογραφία (*Garcia de Jalon D., Gortazar J., 2007*). Στη συνέχεια, με βάση αυτές τις δεδομένες καμπύλες καταλληλότητας βρέθηκε το μαθηματικό πολυώνυμο που ικανοποιεί την κάθε μία ξεχωριστά με το μικρότερο σφάλμα ($R^2=0.98$ έως 0.99). Τα δεδομένα βάθους και ταχύτητας νερού που αντιστοιχούν στην περιοχή μελέτης είναι απαραίτητα για τους υπολογισμούς και είναι σε μορφή σημείων Χ,Υ όλης της περιοχής με τις τιμές βάθους και ταχύτητας νερού που αντιστοιχούν στα σημεία αυτά, δηλαδή συνολικά 1378 σημεία (όσοι και οι υπολογιστικοί κόμβοι). Στα πολυώνυμα εισάγονται τα δεδομένα (όπου Χ στην εξίσωση αντιστοιχεί είτε το βάθος νερού είτε η ταχύτητα νερού) και υπολογίζονται οι δείκτες καταλληλότητας για το βάθος και την ταχύτητα νερού ξεχωριστά. Αν ο δείκτης είναι μικρότερος του 0 τότε παίρνει την τιμή 0, ενώ αν είναι μεγαλύτερος του 1 τότε παίρνει την τιμή 1. Διαφορετικά κρατάει την τιμή που έχει. Στη συνέχεια, ο δείκτης που λαμβάνει υπόψη τους δείκτες του βάθους και της ταχύτητας υπολογίζεται από την τετραγωνική ρίζα αυτών των δύο δεικτών. Η τελική τιμή του δείκτη καταλληλότητας (*overall suitability index*) υπολογίζεται από τη συνθήκη που ισχύει και παραπάνω, όπου αν ο δείκτης είναι μικρότερος του 0 τότε παίρνει την τιμή 0, ενώ αν είναι μεγαλύτερος του 1 τότε παίρνει την τιμή 1. Διαφορετικά κρατάει την τιμή που έχει.

Το υπόστρωμα (*substratum*) δεν λαμβάνεται υπόψη στον τελικό δείκτη καταλληλότητας, καθώς δεν υπάρχει διαθέσιμη ποσοτική πληροφορία όσον αφορά το υλικό του πυθμένα του ποταμού (κοκκομετρία άμμου και χαλικιού) και έτσι δεν μπορεί να γίνει συσχέτιση μεταξύ των δεδομένων και της καμπύλης καταλληλότητας του υποστρώματος.

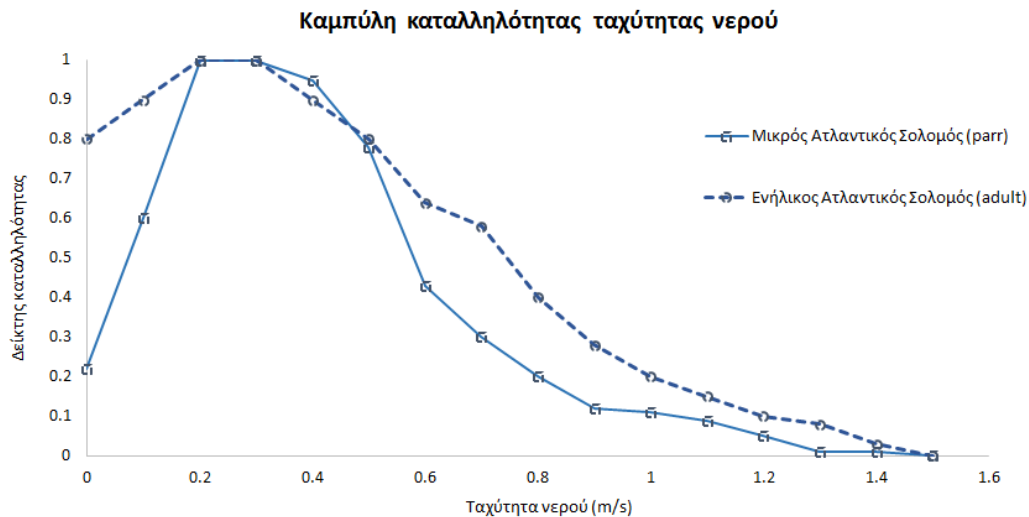


Εικόνα 4.5-1: Διάγραμμα δείκτη καταλληλότητας υποστρώματος για μικρό και ενήλικο Σολομό.

Όπου silt είναι η άργιλος, sand η άμμος, gravel το χαλίκι, cobble οι κροκάλες, boulder οι ογκόλιθοι και bedrock το βραχώδες υπόστρωμα. Οι ενήλικοι Σολομοί προτιμούν χαλίκια και κροκάλες για την περίοδο της αναπαραγωγής τους με μεγαλύτερα βάθη στα οποία θα επικρατούν χαμηλές ταχύτητες στον πυθμένα και υψηλότερες στην επιφάνεια, καθώς και διάφορα 'εμπόδια', όπως βλάστηση, ώστε να συγκρατούνται και να καλύπτονται από κινδύνους τα αυγά που εναποθέτουν. Οι μικροί Σολομοί έχουν σχεδόν τις ίδιες προτιμήσεις στα υλικά απλά με μεγαλύτερη κοκκομετρία σε αντίθεση με τους ενήλικους που χρειάζονται μικρότερη. Επίσης, προτιμούν σε συνδυασμό με τα παραπάνω, μικρότερα βάθη. Γενικά, όσο μεγαλώνουν οι Σολομοί χρειάζονται μεγαλύτερα βάθη και ταχύτερη ροή νερού (Hendry K. & Cragg-Hine D., 2003).



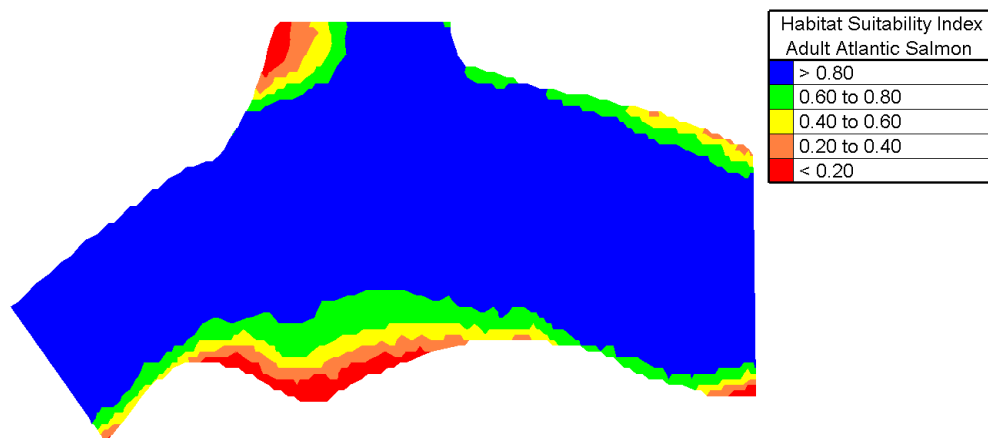
Εικόνα 4.5-2: Καμπύλες καταλληλότητας βάθους νερού για μικρό και ενήλικο Σολομό.



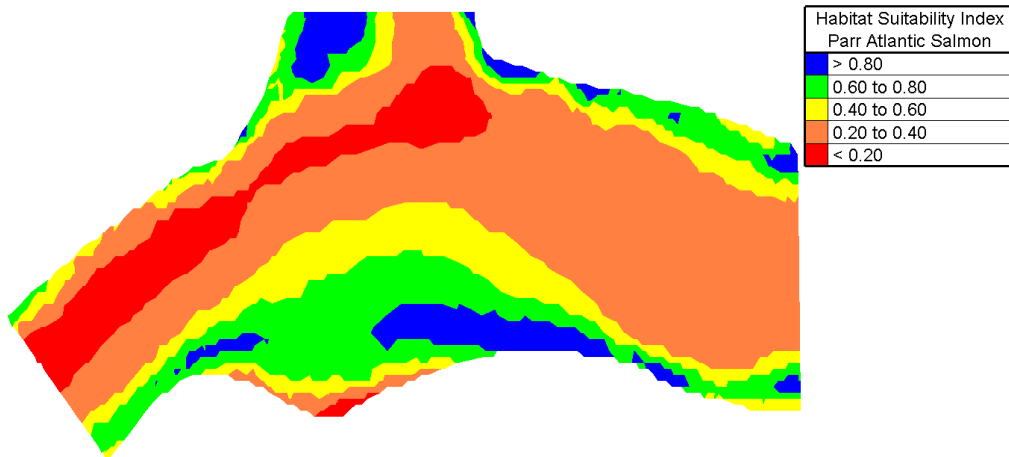
Εικόνα 4.5-3: Καμπύλες καταλληλότητας ταχύτητας νερού για μικρό και ενήλικο Σολομό.

Τα αποτελέσματα από τους υπολογισμούς των δεικτών καταλληλότητας για το κάθε στάδιο ηλικίας προκύπτουν με τη μορφή σημείων Χ,Υ όλης της περιοχής μελέτης και τις τιμές δείκτη καταλληλότητας που αντιστοιχούν στα σημεία αυτά. Τα δεδομένα εισάγονται στο πρόγραμμα *BlueKenue* και δημιουργείται η χρωματική απεικόνιση της κατανομής των δεικτών καταλληλότητας στην περιοχή μελέτης για το στάδιο του ενήλικου και του μικρού Σολομού.

Οι δείκτες καταλληλότητας (*Habitat Suitability Indices-HSI*), που έχουν λάβει υπόψη τους μόνο την ταχύτητα και το βάθος νερού, που αφορούν τον ενήλικο (adult) και τον μικρό (parr) Σολομό αντίστοιχα, όπως φαίνονται στις παρακάτω εικόνες. Το μπλε και το πράσινο χρώμα υποδεικνύει τις καλύτερες συνθήκες τις οποίες προτιμά ο Ατλαντικός Σολομός ανάλογα με το στάδιο της ηλικίας που βρίσκεται.



Εικόνα 4.5-4: Η κατανομή του δείκτη καταλληλότητας στην περιοχή μελέτης για τον ενήλικο Σολομό (adult).



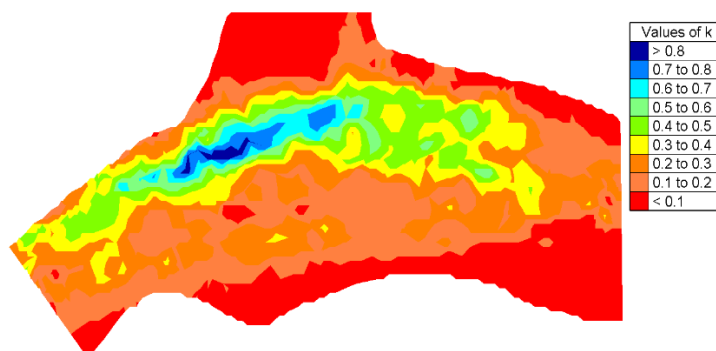
Εικόνα 4.5-5: Η κατανομή του δείκτη καταλληλότητας στην περιοχή μελέτης για τον μικρό Σολομό (parr).

4.5.2. Καμπύλες καταλληλότητας Ατλαντικού Σολομού με βάση την περιοχή μελέτης

Οι προτιμήσεις ενδιαιτήματος του Σολομού για το στάδιο ηλικίας smolt προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο των καμπυλών καταλληλότητας ενδιαιτήματος του Bovee (1986) και συγκεκριμένα με τον 3^ο τύπο κατηγορίας (type III 'habitat preference curves'). Οι καμπύλες καταλληλότητας ενδιαιτήματος σύμφωνα με τον Bovee προέρχονται από δεδομένα παρατηρήσεων της χρήσης του ενδιαιτήματος (δηλ. η υδραυλική στα σημεία όπου παρατηρούνται οι ιχθύες) αλλά διαιρεμένα από την διαθεσιμότητα του ενδιαιτήματος (δηλ. η υδραυλική στα σημεία όπου δεν παρατηρούνται ιχθύες). Τα δεδομένα της ταχύτητας και του βάθους νερού που εξάγονται από το υδροδυναμικό μοντέλο, καθώς και της τραχύτητας του πυθμένα σε συνδυασμό με τις πειραματικές τροχιές των ιχθύων που έχουν καταγραφεί στο πεδίο αποτελούν τα δεδομένα παρατηρήσεων της χρήσης του ενδιαιτήματος.

Πιο αναλυτικά, με τη βοήθεια ενός υπολογιστικού κώδικα, συγκρίνονται οι θέσεις των κόμβων του πλέγματος και οι θέσεις από τις οποίες αποτελούνται οι πειραματικές τροχιές των ιχθύων. Εάν υπάρχουν κόμβοι του πλέγματος οι οποίοι να ταυτίζονται με θέσεις από τις τροχιές σε απόσταση 70 εκ. γύρω από τον εξεταζόμενο κόμβο, τότε ένας μετρητής k παίρνει την τιμή 1. Ο μετρητής θα πάρει την τιμή μόνο για μία φορά που ταυτίζονται οι θέσεις. Η διαδικασία αυτή γίνεται για όλες τις πειραματικές τροχιές. Δηλαδή, ο μετρητής k θα πάρει την τιμή n αν έχουν περάσει από τον κόμβο αυτό και οι n τροχιές. Ο μετρητής k αντιπροσωπεύει ουσιαστικά την χρήση του ενδιαιτήματος και την επισκεψιμότητα των ιχθύων στα σημεία της περιοχής μελέτης. Ταυτόχρονα χρησιμοποιείται ένας δείκτης διαθεσιμότητας A με τον οποίο θεωρούμε διαθεσιμότητα σε όλα τα σημεία X και Y της περιοχής δίνοντας την τιμή 1 στον δείκτη A σε κάθε σημείο. Στη συνέχεια, τα δεδομένα χωρίζονται σε κλάσεις (η ταχύτητα ανά 0.05m/s μέχρι 0.45m/s και το βάθος νερού ανά 0.2m μέχρι 1.6m) και υπολογίζεται για κάθε κλάση το άθροισμα των μετρητών k και το σύνολο του δείκτη A . Στη συνέχεια, διαιρούνται τα αθροίσματα του k με τα σύνολα του A για κάθε κλάση. Τέλος, βρίσκεται η κλάση με τη μέγιστη τιμή k/A και διαιρούνται όλες οι τιμές με αυτή την τιμή ώστε να κανονικοποιηθούν όλες οι τιμές ως προς τη μονάδα. Οι τιμές αυτές αποτελούν τους δείκτες καταλληλότητας και είναι μικρότερες της

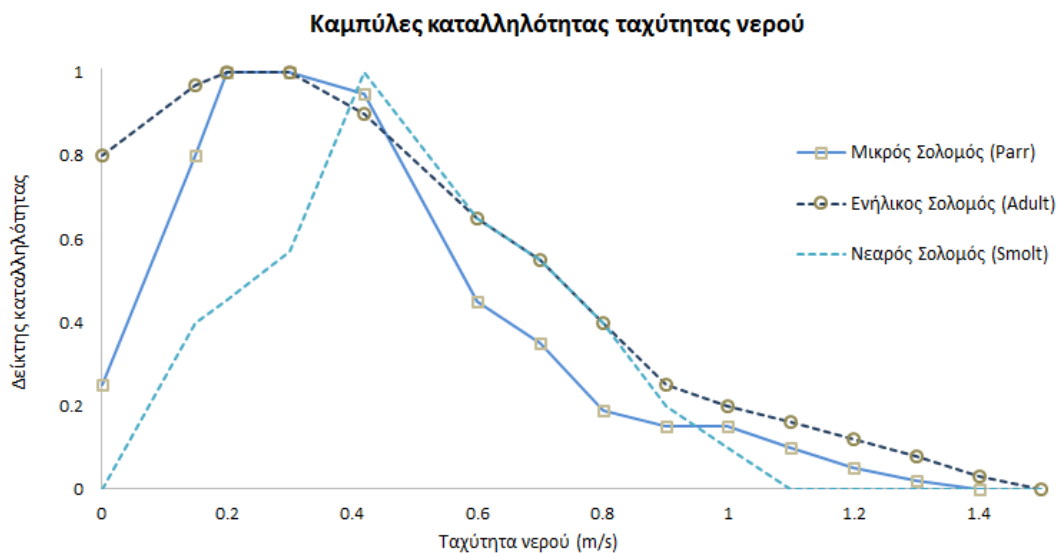
μονάδας, με μέγιστη τιμή την μονάδα. Οι καμπύλες καταλληλότητας είναι έτοιμες για δημιουργία. Στον άξονα Χ δίνονται οι αντίστοιχες κλάσεις για την ταχύτητα, το βάθος νερού και το υπόστρωμα, ενώ στον άξονα Υ δίνονται οι τιμές του δείκτη καταλληλότητας.



Εικόνα 4.5-6: Διακύμανση των τιμών του μετρητή *k*. Υψηλότερες τιμές υποδεικνύουν περισσότερες επισκέψεις στα σημεία αυτά από τους μελετώμενους ιχθύες

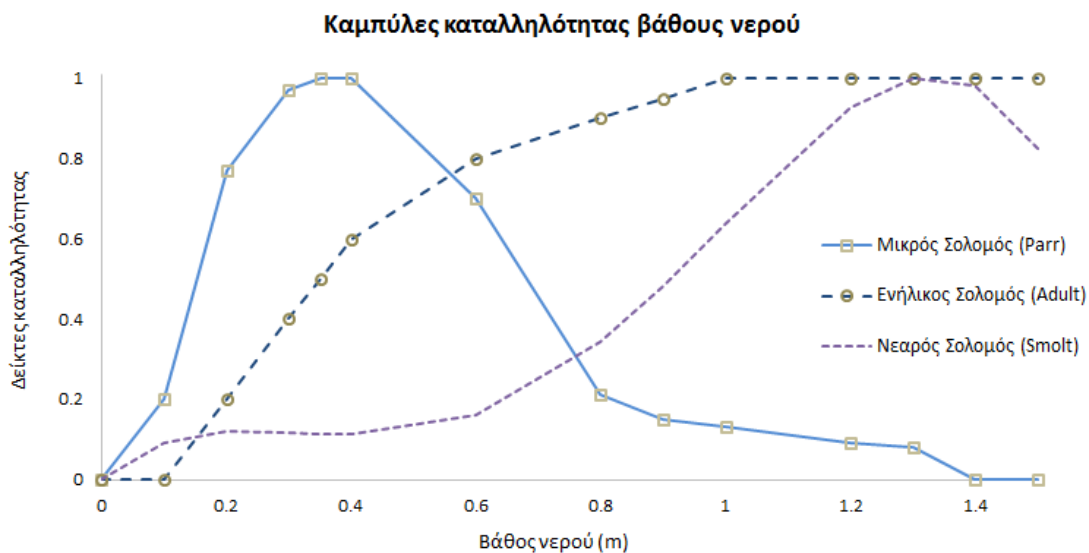
Με την ίδια διαδικασία που περιγράφεται στις καμπύλες καταλληλότητας του ενήλικου και νεαρού Σολομού (εύρεση πολυωνύμων κάθε καμπύλης, υπολογισμός ενδιάμεσων δεικτών και έλεγχος να είναι μικρότερη η τιμή από το 0 και το 1 κλπ.), υπολογίζονται οι δείκτες καταλληλότητας για κάθε σημείο Χ,Υ με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή υπάρχουν πληροφορίες για το υπόστρωμα από τους συντελεστές Manning που έχουν επιλεγεί για το υδροδυναμικό μοντέλο. Να σημειωθεί ότι η επιλογή της εξίσωσης του πολυώνυμου γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η καμπύλη να παραμένει μέχρι τη μέγιστη τιμή 1 του δείκτη καταλληλότητας και να μην την ξεπερνάει. Ο δείκτης καταλληλότητας για το υπόστρωμα λαμβάνει την αντίστοιχη τιμή που έχει βρεθεί ως η καλύτερη ή η χειρότερη για τον ιχθύ, μέσω συνθήκης που ελέγχει (δηλαδή για τιμή τραχύτητας 0.01 που προκύπτει δείκτης καταλληλότητας 1, τότε ο δείκτης καταλληλότητας υποστρώματος παίρνει την τιμή 1). Στη συνέχεια, ο δείκτης που λαμβάνει υπόψη τους τρεις δείκτες, δηλαδή του βάθους και της ταχύτητας του νερού και του υποστρώματος υπολογίζεται από την τρίτη ρίζα του γινομένου των τριών δεικτών. Η τελική τιμή του δείκτη καταλληλότητας (*overall suitability index*) υπολογίζεται από τη συνθήκη που ελέγχει αν ο δείκτης είναι μικρότερος του 0 τότε παίρνει την τιμή 0, ενώ αν είναι μεγαλύτερος του 1 τότε παίρνει την τιμή 1. Διαφορετικά κρατάει την τιμή που έχει.

Οι τελικές καμπύλες καταλληλότητας για ταχύτητα, βάθος νερού και τιμές τραχύτητας Manning που προκύπτουν εμφανίζονται παρακάτω. Στην ταχύτητα και στο βάθος νερού εμφανίζονται συνδυαστικά οι καμπύλες και για τα 3 στάδια του Σολομού.



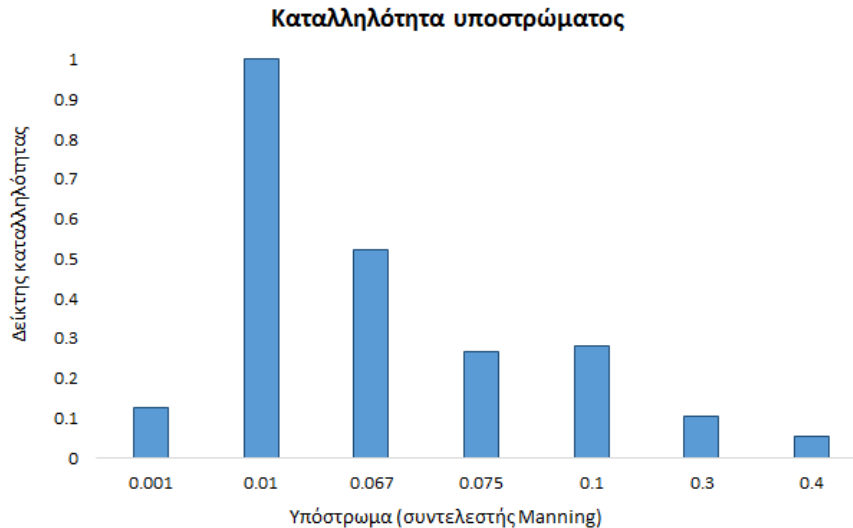
Εικόνα 4.5-7: Καμπύλη καταλληλότητας ταχύτητας νερού και για τα 3 στάδια του Ατλαντικού Σολομού.

Σχετικά με την ταχύτητα νερού, δεν υπάρχουν δεδομένα για μεγαλύτερες ταχύτητες όπως στις βιβλιογραφικές καμπύλες καταλληλότητας του ενήλικου και του μικρού Σολομού, οι οποίες φτάνουν μέχρι 1.5 m/s, οπότε υποθέτουμε την διακύμανση της καμπύλης. Παρόλα αυτά στο νεαρό Σολομό παρατηρείται μεγαλύτερη προτίμηση σε ταχύτητες πάνω από 0.30 m/s με 0.35 m/s και μέγιστη καταλληλότητα σε ταχύτητα 0.40 m/s.



Εικόνα 4.5-8: Καμπύλη καταλληλότητας βάθους νερού και για τα 3 στάδια του Ατλαντικού Σολομού.

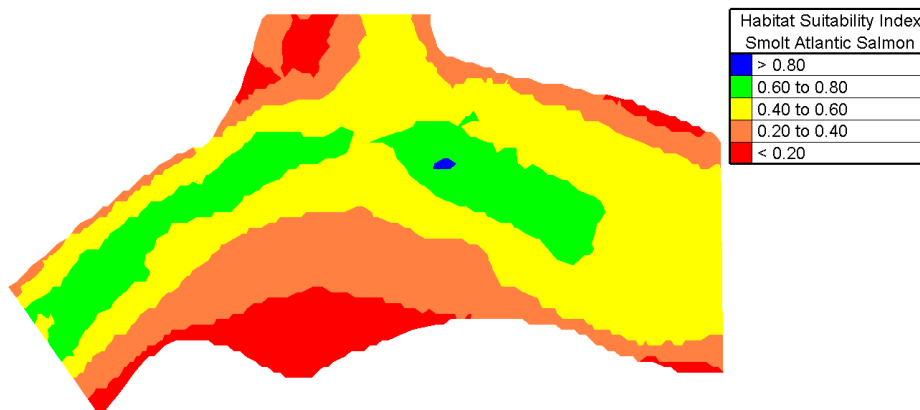
Παρατηρείται ότι ο νεαρός Σολομός με βάση τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, προτιμά βάθη νερού κυρίως πάνω από 1 m και μέχρι 1.5 m.



Εικόνα 4.5-9: Καταλληλότητα υποστρώματος πυθμένα για το νεαρό (smolt) Ατλαντικό Σολομό.

Όσον αφορά το υπόστρωμα του πυθμένα του ποταμού, παρατηρείται μέγιστη τιμή καταλληλότητας 1 για τιμή συντελεστή Manning 0.01. Αμέσως μετά προτιμάται τιμή συντελεστή Manning 0.067 με δείκτη καταλληλότητας 0.50. Θεωρητικά μπορούμε να υποθέσουμε ότι για τιμές των συντελεστών Manning μεταξύ 0.067 και 0.01 θα αντιστοιχούν επίσης πολύ καλοί δείκτες καταλληλότητας.

Για την χρωματική απεικόνιση της κατανομής του τελικού δείκτη καταλληλότητας όπως διαμορφώνεται στην περιοχή μελέτης χρησιμοποιείται και πάλι το πρόγραμμα *BlueKenue*. Ο συνολικός δείκτης καταλληλότητας (*overall suitability index*), που λαμβάνει υπόψη το βάθος νερού, την ταχύτητα του νερού και το υπόστρωμα του πυθμένα του ποταμού, της περιοχής μελέτης που αφορά το νεαρό (smolt) Σολομό, κυμαίνεται όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Το μπλε και το πράσινο χρώμα υποδεικνύουν τις καλύτερες συνθήκες τις οποίες προτιμά ο Ατλαντικός Σολομός στη συγκεκριμένη ηλικία. Με βάση, λοιπόν, τις πειραματικές τροχιές των ιχθύων οι περιοχές που απεικονίζονται με πράσινο χρώμα προκύπτουν ως οι περισσότερο επισκέψιμες από τους ιχθύες και στη συνέχεια έπονται οι περιοχές με το κίτρινο χρώμα.



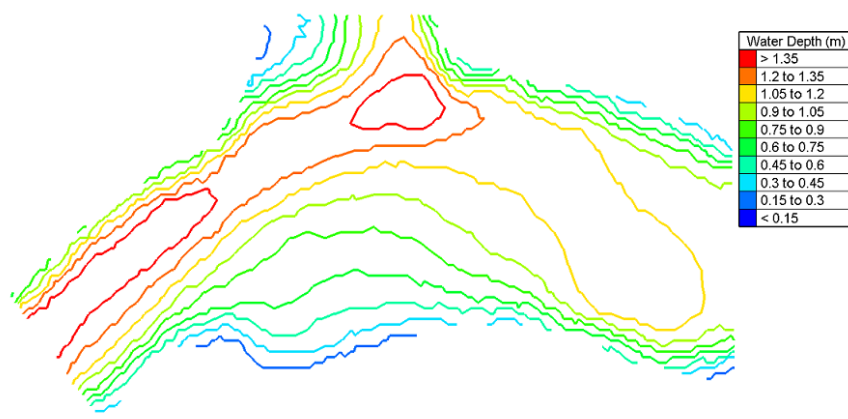
Εικόνα 4.5-10: Κατανομή δείκτη καταλληλότητας στην περιοχή μελέτης για τον νεαρό Σολομό (smolt).

Με βάση τα παραπάνω, εξετάστηκε αν τα αποτελέσματα που προκύπτουν επιβεβαιώνονται και από άλλες μελέτες. Στους Thorstad et al., 2012, αναφέρεται ότι η κατάντη μετανάστευση των smolts θεωρούνταν πρωτύτερα ότι είναι μία παθητική συμπαράσυρση από τα ρεύματα των ποταμών, όμως αρκετές μελέτες έχουν καταγράψει ότι η κατάντη μετανάστευση είναι ενεργητική διαδικασία με τους smolts να κολυμπούν ταχύτερα από τη ροή του ποταμού (όπως ευρίσκεται στους Fangstam, 1993; Davidsen et al., 2005; Svendsen et al., 2007). Ακόμη, (όπως αναφέρεται στους Hansen & Johnsson, 1985; Davidsen et al., 2007; Svendsen et al., 2007) αναφέρεται ότι οι Σολομοί μεγέθους smolt που μεταναστεύουν, συχνά χρησιμοποιούν το μέρος του ποταμού με την υψηλότερη ταχύτητα νερού και φαίνεται να αποφεύγουν τις περιοχές με στάσιμα νερά. Επίσης αναφέρεται (Hesthagen & Garnas, 1986; Hvidsten & Johnsen, 1997; Davidsen et al., 2005; Svendsen et al., 2007) η προτίμηση των νεαρών Σολομών σε πιο βαθιά νερά αλλά και σε πιο επιφανειακά νερά. Οι διαφορές αυτές στο μεταναστευτικό βάθος ίσως είναι μια προσαρμογή για να αποφύγουν τους θηρευτές ή προσαρμογή ώστε να χρησιμοποιήσουν το κομμάτι του ποταμού με τις υψηλότερες ταχύτητες νερού (όπως αναφέρεται στους Davidsen et al., 2005).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1. Αποτελέσματα εφαρμογής υδροδυναμικού μοντέλου

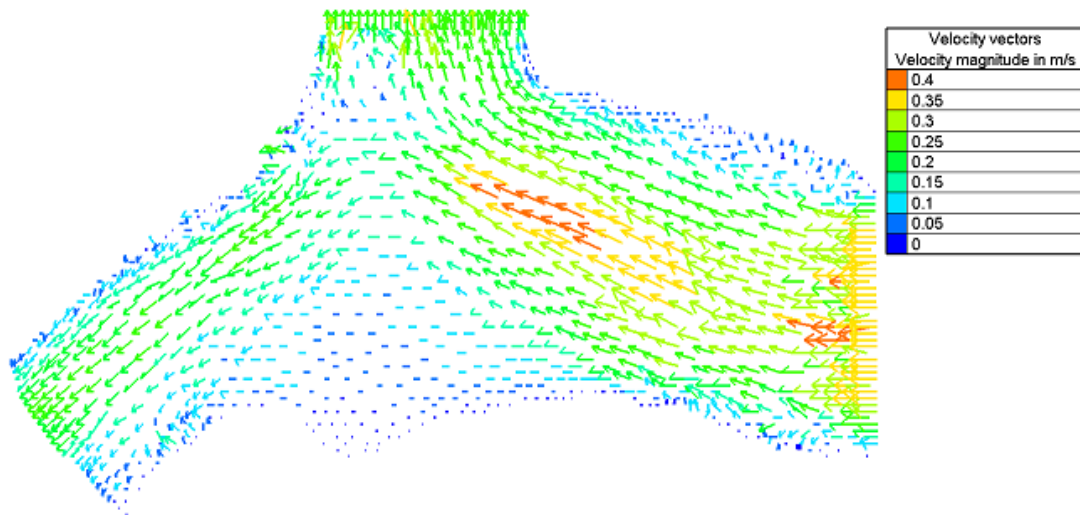
Τα αποτελέσματα βάθους νερού και ταχυτήτων της προσομοίωσης του τελικού υδροδυναμικού μοντέλου απεικονίζονται με ισοδυναμικές γραμμές στην παρακάτω εικόνα. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά υπολογίζονται τα προφίλ ταχυτήτων στις χαρακτηριστικές διατομές (κεφάλαιο 3), καθώς και η δημιουργία του δομημένου πλέγματος με την παρεμβολή των τιμών αυτών στους κόμβους (κεφάλαιο 4).



Εικόνα 5.1-1: Ισοδυναμικές καμπύλες της διακύμανσης του βάθους νερού στο πεδίο.



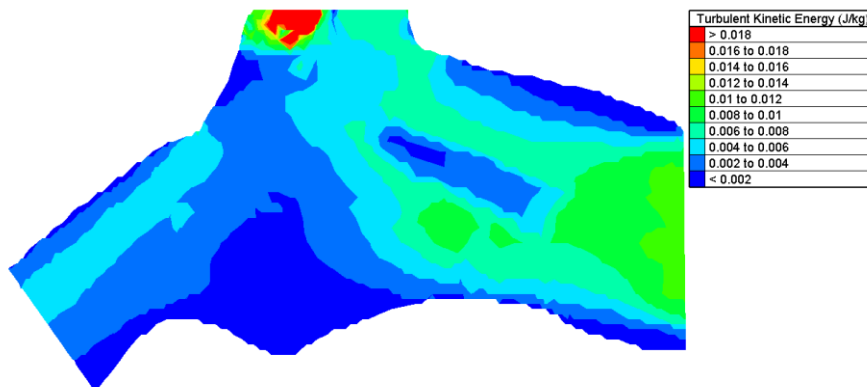
Εικόνα 5.1-2: Ισοδυναμικές γραμμές της διακύμανσης της ταχύτητας του νερού στο πεδίο ροής.



Εικόνα 5.1-3: Τα βέλη κατεύθυνσης των ταχυτήτων του πεδίου ροής.

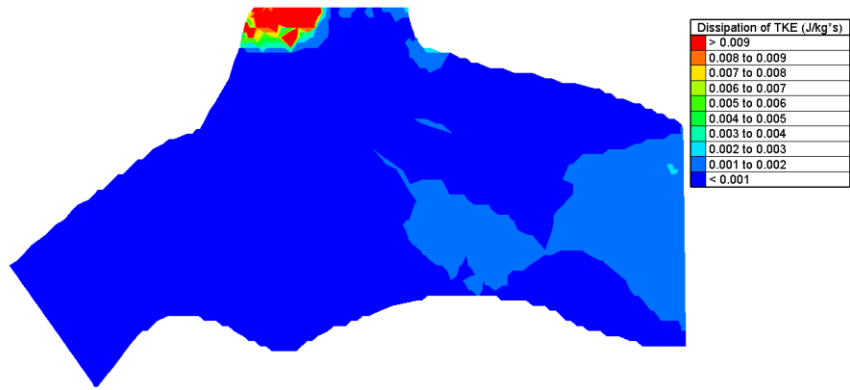
5.1.1. Τυρβώδης κινητική ενέργεια και συσχέτιση με τις πειραματικές τροχιές των ιχθύων

Η κατανομή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (TKE-turbulent kinetic energy) που προκύπτει από το υδροδυναμικό μοντέλο όπως διαμορφώνεται στο πεδίο ροής παρουσιάζεται στην εικόνα 5.2-46. Η TKE δίνεται σε μονάδες J/kg ή m^2/s^2 .



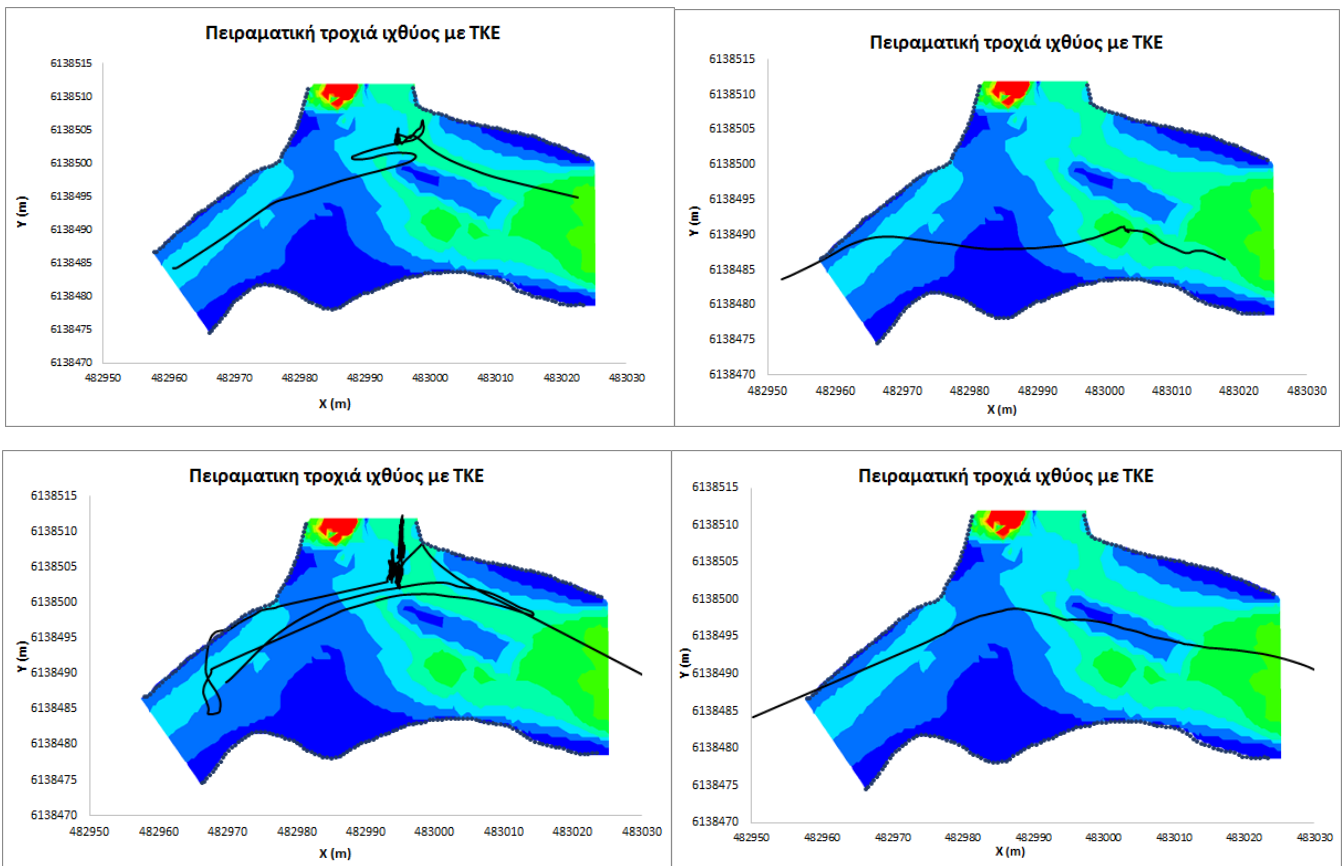
Εικόνα 5.1-4: Κατανομή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k στο πεδίο ροής (σε μονάδες J/kg).

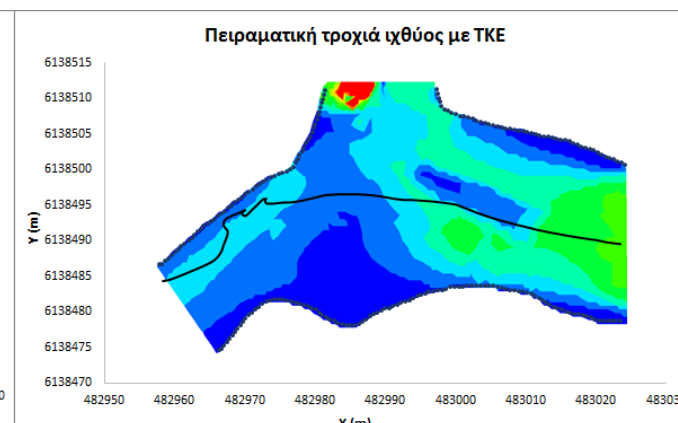
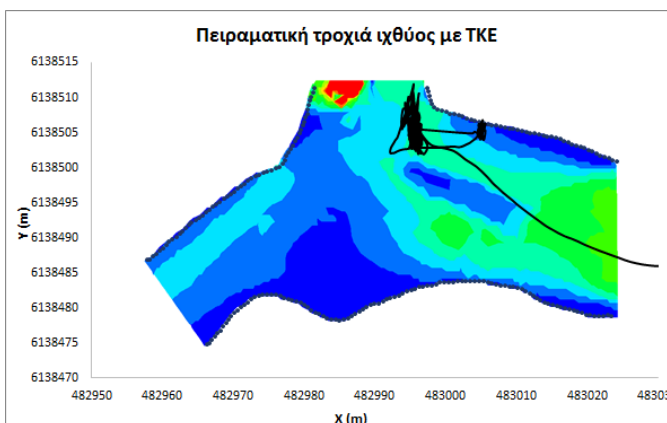
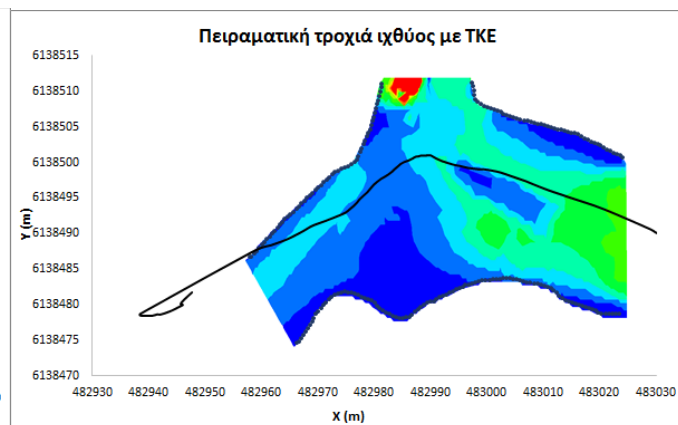
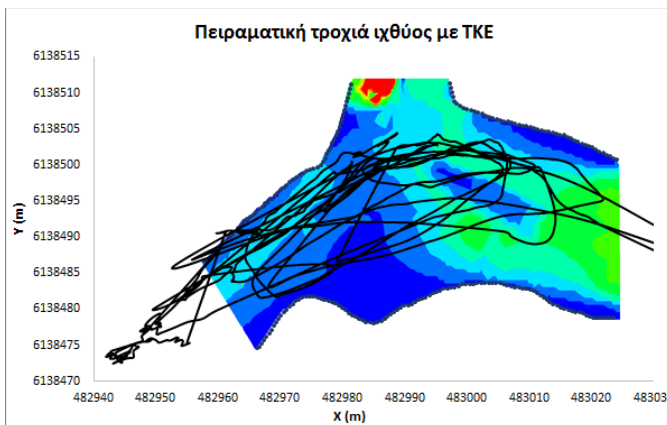
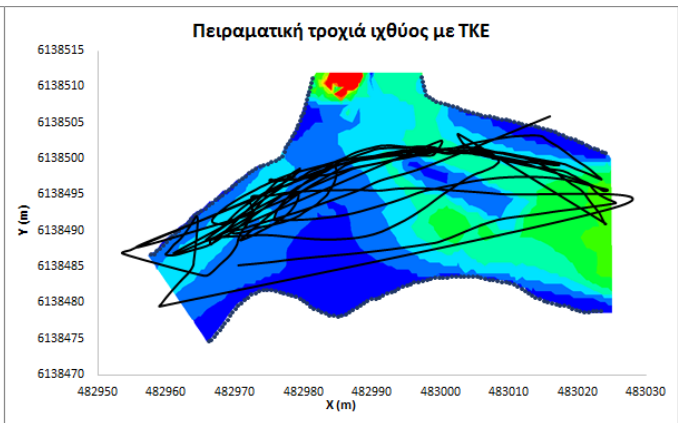
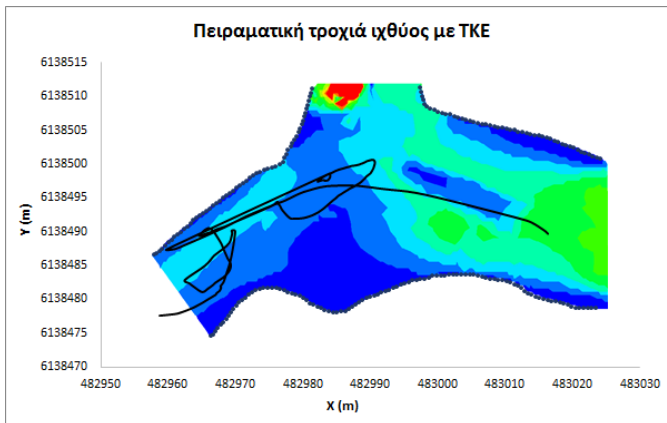
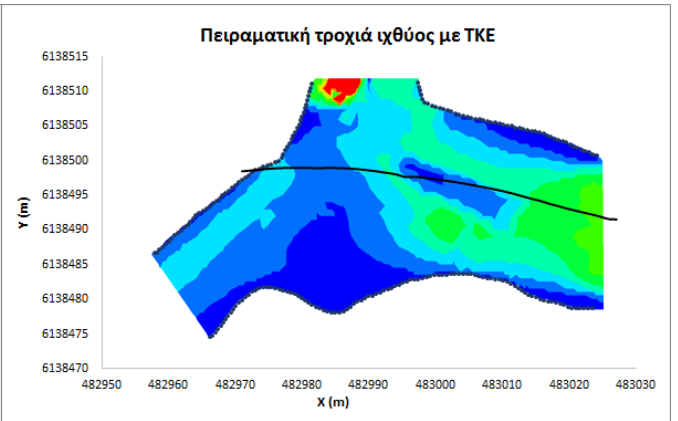
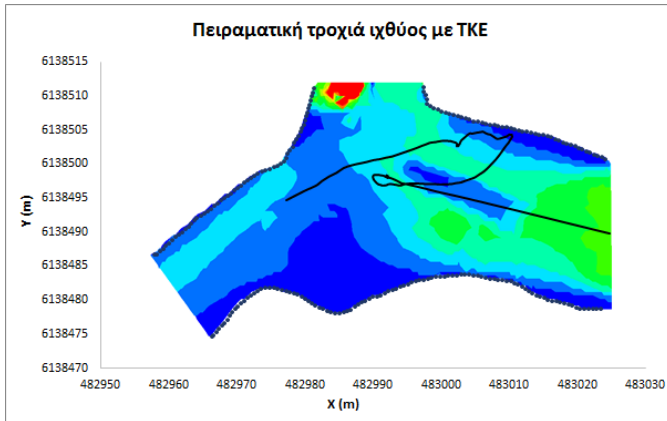
Η κατανομή του ρυθμού απόσβεσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (E-dissipation rate of TKE) που προκύπτει από το υδροδυναμικό μοντέλο όπως διαμορφώνεται στο πεδίο ροής παρουσιάζεται στην εικόνα. Ο ρυθμός E δίνεται σε μονάδες J/kg*s.

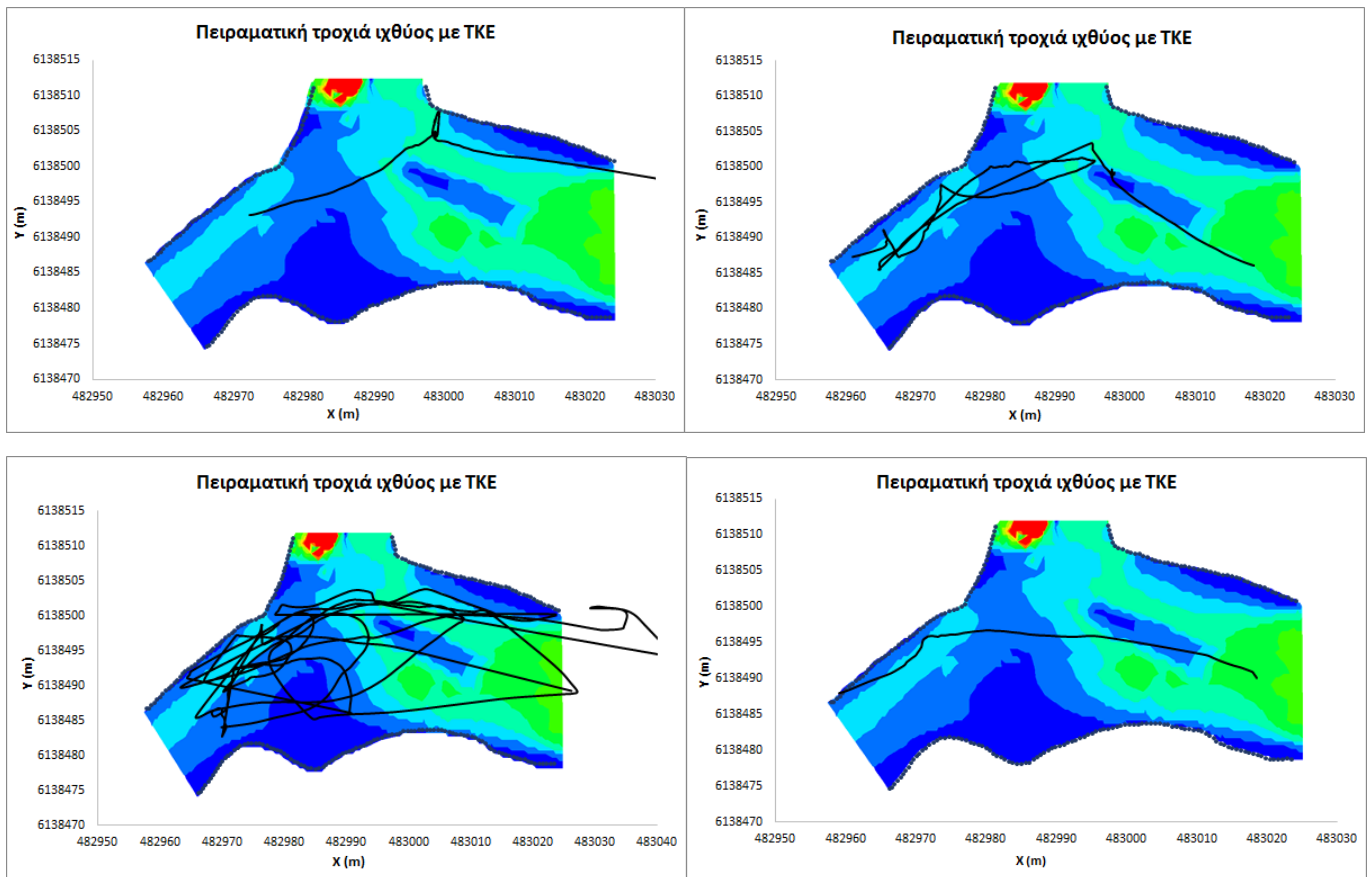


Εικόνα 5.1-5: Κατανομή της απόσβεσης ϵ της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k στο πεδίο ροής (σε μονάδες J/kg*s).

Τα δεδομένα της τυρβώδους ροής συνδυάζονται με τις πειραματικές τροχιές των ιχθύων που εξετάζονται στο πεδίο και με βάση αυτά γίνεται προσπάθεια εκτίμησης των προτιμήσεων του Σολομού στο στάδιο ηλικίας smolt για την τυρβώδη κινητική ενέργεια.







Εικόνα 5.1-6: 16 πειραματικές τροχιές ιχθύων σε συνδυασμό με την κατανομή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας στο πεδίο ροής.

Από τις εικόνες παρατηρείται ότι ο Ατλαντικός Σολομός μεγέθους smolt προτιμά ένα εύρος τιμών της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k , από πολύ χαμηλές τιμές όπως $0.002 \text{ m}^2/\text{s}^2$ έως $0.014 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Κυρίως όμως κυμαίνεται περισσότερο στο εύρος $0.008 \text{ m}^2/\text{s}^2$ έως $0.014 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Στην έρευνα των Enders et al. (2009) κατά την οποία μελετάται η προτίμηση των μικρών (parr) Σολομών ενδιαιτήματος με βάση την τύρβη που επικρατεί στο πεδίο ροής του ποταμού, παρατηρείται ότι οι μικροί Σολομοί, οι οποίοι εκτέθηκαν σε διακύμανση ταχύτητας ροής από 0.0m/s έως 0.31m/s , έδειξαν μεγάλη μεταβλητότητα ως προς τις φυσικές συνθήκες τύρβης, η οποία κυμαινόταν από $0.0 \text{ m}^2/\text{s}^2$ έως $0.096\text{m}^2/\text{s}^2$. Παρότι η μελέτη αναφέρεται στο μέγεθος parr του Σολομού, από τους δείκτες καταλληλότητας ταχύτητας νερού για κάθε στάδιο ηλικίας παρατηρούμε ότι έχουν όλα τα στάδια ηλικίας σχετικά παρόμοιες προτιμήσεις. Για το εύρος ταχυτήτων νερού από 0.20m/s έως 0.40m/s παρουσιάζονται σχεδόν μέγιστοι δείκτες καταλληλότητας στην ηλικίας του μικρού Σολομού (parr), ενώ στο στάδιο του νεαρού Σολομού (smolt) ο δείκτης καταλληλότητας είναι σχετικά καλός για ταχύτητες 0.22m/s περίπου και μέγιστος για τιμές ταχυτήτων από 0.30m/s και πάνω. Από τη στιγμή που η τυρβώδης κινητική ενέργεια εξαρτάται από τις ταχύτητες του πεδίου ροής, συμπεραίνουμε ότι και στο στάδιο ηλικίας smolt ο Ατλαντικός Σολομός έχει την ικανότητα να προσαρμόζεται στην διακύμανση της τύρβης του πεδίου ροής.

5.2. Αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων

Το μοντέλο συμπεριφοράς ιχθύων εφαρμόζεται σύμφωνα με τη δομή που αναλύεται στο κεφάλαιο 4. Τα δεδομένα που χρειάζεται το μοντέλο είναι το δομημένο υπολογιστικό πλέγμα και οι συνιστώσες της ταχύτητας U , V , οι οποίες υπολογίζονται από το υδροδυναμικό μοντέλο Telemac 2D. Πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας σε κάποιες παραμέτρους του μοντέλου ώστε να μελετηθεί η επίδραση τους στη συμπεριφορά των ιχθύων. Τα αποτελέσματα του μοντέλου που προκύπτουν είναι τροχιές ιχθύων, σε μορφή σημείων X , Y , οι οποίες συγκρίνονται με τις τροχιές των μελετώμενων ιχθύων που έχουν καταγραφεί στο πεδίο (Svendsen et al., 2011), ώστε να γίνει δυνατή η βαθμονόμηση του μοντέλου ιχθύων μέσω της προσαρμογής των τιμών των παραμέτρων.

Μετά την ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του μοντέλου και αφού έχουν καθοριστεί οι σημαντικότερες παράμετροι που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του ιχθύος, γίνεται προσπάθεια προσομοίωσης της συμπεριφοράς που παρουσιάζουν οι εξεταζόμενοι ιχθύες στην έρευνα των Svendsen et al. (2011). Οι ιχθύες ακολουθούν κατά ένα μεγαλύτερο ποσοστό την ευθεία πορεία (*non-milling*) συνεχίζοντας την κατάντη μετανάστευση, η οποία μεταφράζεται ως συμπεριφορά B1 με βάση το μοντέλο ιχθύων και κατά ένα μικρότερο ποσοστό εμφανίζουν κυκλικές πορείες (*milling*) περνώντας περισσότερο χρόνο μέσα στην περιοχή μελέτης, που μεταφράζεται ως συμπεριφορά B2 και B3 στο μοντέλο ιχθύος. Τα ποσοστά αυτά ενσωματώνονται στις σημαντικότερες παραμέτρους και παράλληλα εξετάζεται η επίδραση της τυχαιότητας (*random*) στη συμπεριφορά των ιχθύων.



Εικόνα 5.2-1: Συμπεριφορά *milling* [πηγή: royalsocietypublishing.org].

5.2.1. Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων

Η μέθοδος που ακολουθείται για την ανάλυση ευαισθησίας είναι η διακύμανση μίας παραμέτρου την φορά (*one factor at a time-OFAT*), κατά την οποία αλλάζει η τιμή μίας μόνο παραμέτρου ενώ οι τιμές των υπόλοιπων παραμένουν στις ονομαστικές τους τιμές. Μετά την επεξεργασία η παράμετρος επιστρέφει στην αρχική της τιμή και εξετάζεται η επόμενη. Η ίδια διαδικασία γίνεται για κάθε παράμετρο που μελετάται. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται για 1 ιχθύ με δύο διαφορετικές θέσεις εκκίνησης, με χρονικό βήμα 2 δευτερόλεπτα και μέγιστο αριθμό επαναλήψεων 1000 ανά ιχθύ. Όπως αναφέρεται στη δομή του μοντέλου στο κεφάλαιο 4, αν ο ιχθύς βγει εκτός των υπολογιστικών ορίων η προσομοίωση σταματά χωρίς να είναι απαραίτητο

να γίνουν και οι 1000 επαναλήψεις. Εκτός από τις παραμέτρους, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας και για την θέση εκκίνησης του ιχθύ με 100 διαφορετικές θέσεις εκκίνησης. Επίσης, το μήκος του ιχθύ που εξετάζεται είναι 19 cm, όπως οι ιχθύες που μελετώνται στην έρευνα των Svendsen et al. (2011).

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι προκαθορισμένες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου. Οι προκαθορισμένες τιμές των παραμέτρων επιλέγονται όπως αναφέρονται στην μεταπτυχιακή εργασία 'Mathematical model on simulating fish-behavior in river flows' (Παγωνόπουλος Σ., 2017) και οι οποίες έχουν καθοριστεί με βάση τις αρχές του ELAM μοντέλου των Goodwin et al. (2014).

Πίνακας 5.2-1: Προκαθορισμένες τιμές παραμέτρων του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων

Προκαθορισμένες τιμές μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων			
Παράμετρος	Συμπεριφορά	Τιμή	Εύρος τιμών
Τιμή κατωφλιού (threshold)	B1	0.0 (σταθερή τιμή)	-
Τιμή κατωφλιού (threshold)	B2	0.84	-
Τιμή κατωφλιού (threshold)	B3	0.90	-
Συντελεστής μνήμης εγκλιματισμού (memory acclimatization coefficient)	B2	0.99	0.0-1.0
Συντελεστής μνήμης εγκλιματισμού (memory acclimatization coefficient)	B3	0.95	0.0-1.0
Συντελεστής μνήμης συμπεριφοράς (memory behavior coefficient)	B1	1.0	0.0-1.0
Συντελεστής μνήμης συμπεριφοράς (memory behavior coefficient)	B2	0.0	0.0-1.0
Συντελεστής μνήμης συμπεριφοράς (memory behavior coefficient)	B3	1.0	0.0-1.0
Εσωτερική χρησιμότητα συμπεριφοράς (intrinsic utility)	B1	1.0	0.0-1.0
Εσωτερική χρησιμότητα συμπεριφοράς (intrinsic utility)	B2	0.5	0.0-1.0
Εσωτερική χρησιμότητα συμπεριφοράς (intrinsic utility)	B3	1.0	0.0-1.0

Η τιμή κατωφλιού για τη συμπεριφορά B1 παραμένει σταθερή στην τιμή 0.0, ώστε οι ιχθύες να έχουν ως προκαθορισμένη συμπεριφορά την B1, δηλαδή να ακολουθούν ευθεία πορεία με την κατεύθυνση της ροής χωρίς ξαφνικές αλλαγές.

Όλες οι τιμές των παραμέτρων εκτός από τα κατώφλια, κυμαίνονται μεταξύ 0.0 η ελάχιστη και 1.0 η μέγιστη.

Οι δύο θέσεις εκκίνησης που επιλέγονται για την ανάλυση ευαισθησίας αποτελούν θέσεις εκκίνησης πειραματικών τροχιών και συγκεκριμένα η μία θέση είναι πιο κοντά στην άνω όχθη (θέση A) και η άλλη θέση πιο χαμηλά (θέση B). Στην ανάλυση εξετάζονται τα εξής σενάρια:

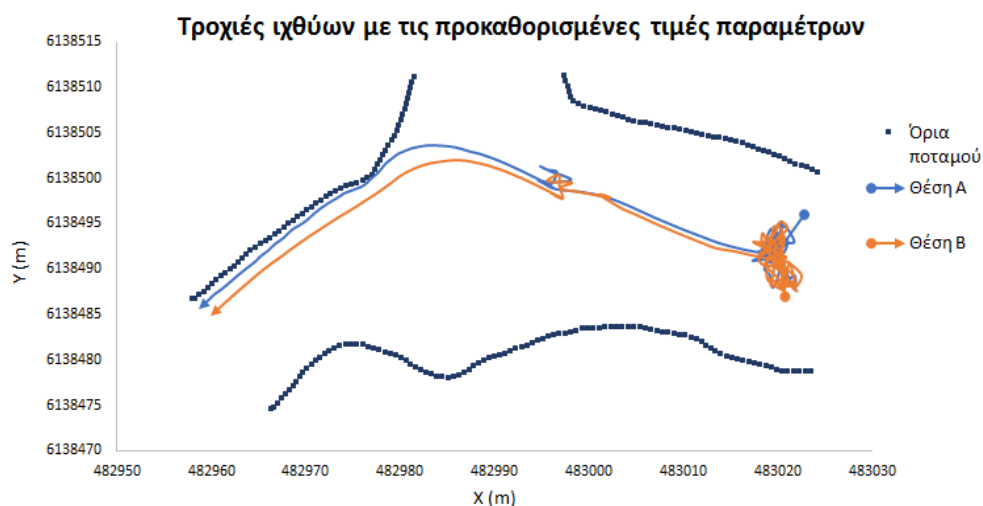
- Σενάριο 1: Μείωση της τιμής κατωφλιού ($threshold(2)$) που αντιστοιχεί στη συμπεριφορά B2.
- Σενάριο 2: Μείωση της τιμής κατωφλιού ($threshold(3)$) που αντιστοιχεί στη συμπεριφορά B3.
- Σενάριο 3: Δοκιμή με διάφορες τιμές από το εύρος του συντελεστή μνήμης για τη συμπεριφορά B1 (*memory behavior coefficient*).
- Σενάριο 4: Δοκιμή με διάφορες τιμές από το εύρος του συντελεστή μνήμης για τη συμπεριφορά B2 (*memory behavior coefficient*).
- Σενάριο 5: Δοκιμή με διάφορες τιμές από το εύρος του συντελεστή μνήμης για τη συμπεριφορά B3 (*memory behavior coefficient*).
- Σενάριο 6: : Δοκιμή με διάφορες τιμές από το εύρος του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας για τη συμπεριφορά B2 (*intrinsic utility coefficient*).
- Σενάριο 7: Δοκιμή με διάφορες τιμές από το εύρος του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας για τη συμπεριφορά B2 (*intrinsic utility coefficient*).
- Σενάριο 8: Δοκιμή με διάφορες τιμές από το εύρος του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας για τη συμπεριφορά B3 (*intrinsic utility coefficient*).

Οι συντεταγμένες των εξεταζόμενων θέσεων εκκίνησης είναι:

Θέση εκκίνησης A: X=483022.83, Y=6138496.00

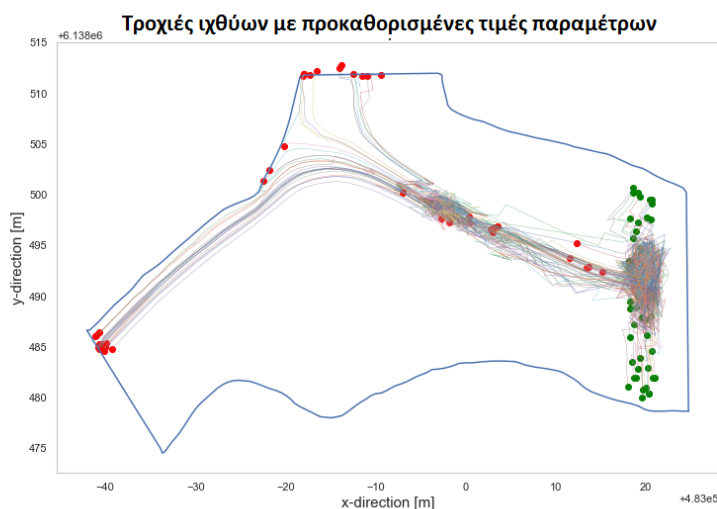
Θέση εκκίνησης B: X=483020.78, Y=6138487.01

Για τις προκαθορισμένες τιμές των συντελεστών του μοντέλου οι τροχιές των ιχθύων με τις θέσεις εκκίνησης A και B προκύπτουν ως εξής:



Εικόνα 5.2-2: Τροχιές ιχθύων με τις προκαθορισμένες (default) τιμές παραμέτρων για τις θέσεις A και B.

Ακόμη δίνονται οι τροχιές των ιχθύων για 100 διαφορετικές θέσεις εκκίνησης όπως προκύπτουν από την προσομοίωση του μοντέλου ιχθύος με τις προκαθορισμένες τιμές παραμέτρων.



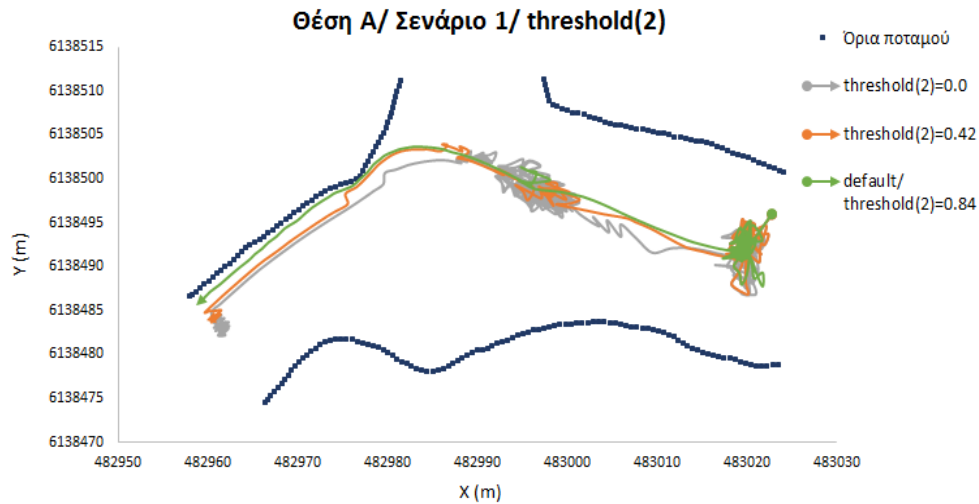
Εικόνα 5.2-3: Τροχιές ιχθύων με τις προκαθορισμένες (default) τιμές παραμέτρων. Οι 100 διαφορετικές θέσεις εκκίνησης συμβολίζονται με τις πράσινες κουκκίδες και οι τελικές θέσεις των τροχιών με τις κόκκινες κουκκίδες.

Παρατηρούμε ότι όλοι οι ιχθύες περνούν πρώτα από το κέντρο της εισόδου στην περιοχή μελέτης, ακολουθούν κυκλικές πορείες γύρω από τις περιοχές με τις υψηλότερες ταχύτητες και ύστερα συνεχίζουν την πορεία τους. Ενεργοποιούνται δηλαδή οι συμπεριφορές B1 και B2. Επίσης, οι περισσότεροι ιχθύες συνεχίζουν την κατάντη μετανάστευση τους μετά την έξοδο από την περιοχή μελέτης, ενώ κάποιοι είτε περνούν μέσα στο fish farm είτε περνούν από την είσοδο του και συνεχίζουν προς τα κατάντη.

Στα σενάρια που αναλύονται παρακάτω, πρώτα παρουσιάζονται οι τροχιές για τις επιλεγμένες θέσεις A και B και στη συνέχεια οι 100 θέσεις εκκίνησης των σεναρίων αυτών.

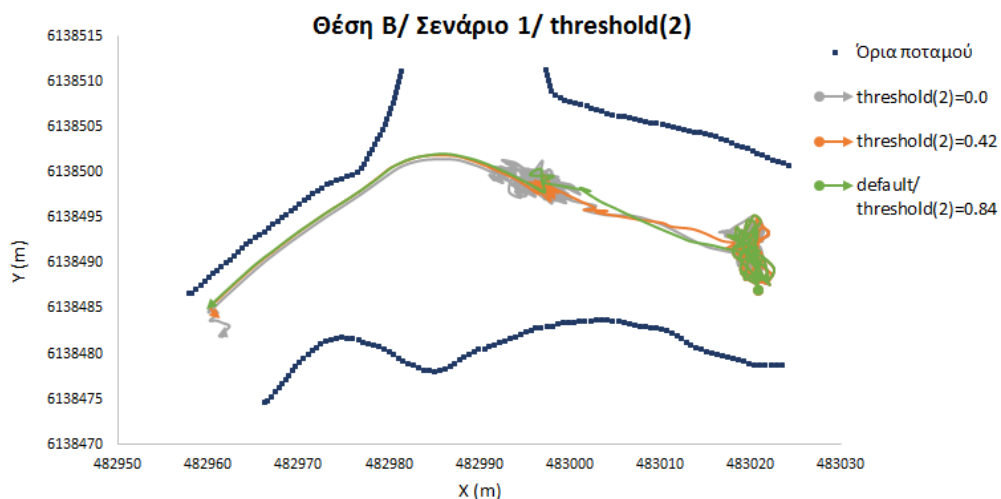
Σενάριο 1: Τιμή κατωφλιού συμπεριφοράς B2 (threshold(2))

Όλες οι τιμές των παραμέτρων παραμένουν ίδιες και αλλάζει μόνο η τιμή κατωφλιού για τη συμπεριφορά B2 (*threshold(2)*). Η αρχική τιμή της παραμέτρου είναι 0.84, μειώνεται πρώτα κατά 50% στην τιμή 0.42 και τέλος μέχρι να μηδενιστεί.



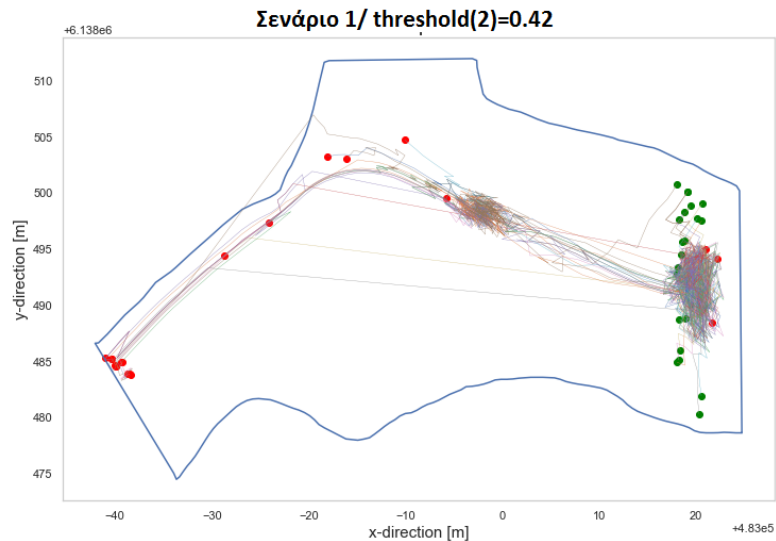
Εικόνα 5.2-4: Θέση Α/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 1: μείωση της τιμής κατωφλιού της B2 (*threshold(2)*) από 0.84 σε 0.42 και σε 0.0.

Παρατηρείται ότι όσο μειώνεται η τιμή κατωφλιού της συμπεριφοράς B2, τόσο μεγαλύτερες κυκλικές πορείες σημειώνει ο ιχθύς γύρω από τις περιοχές με τις υψηλότερες ταχύτητες νερού. Δηλαδή όσο τείνει να μηδενιστεί η τιμή κατωφλιού ενεργοποιείται περισσότερες φορές η συμπεριφορά B2 που αντιστοιχεί σε κολύμβηση προς τις υψηλότερες ταχύτητες νερού ώστε ο ιχθύς να μειώσει τις τάσεις που δέχεται και να συνεχίσει την κατάντη μετανάστευση.

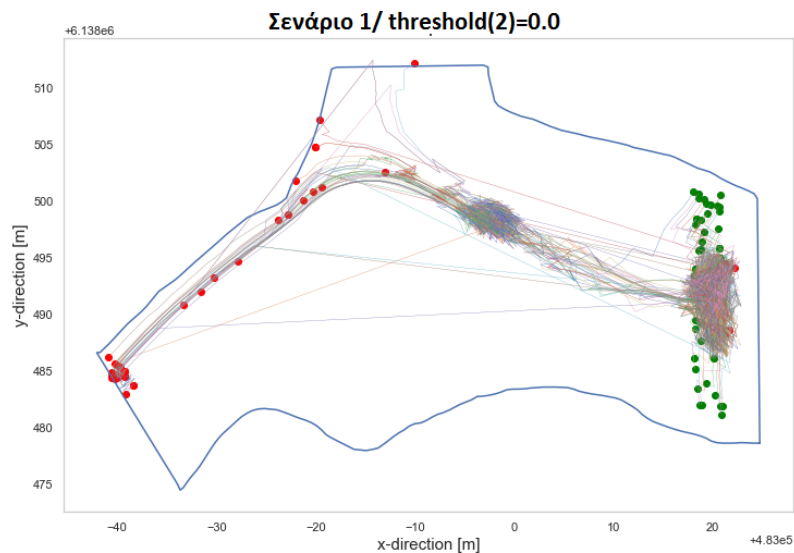


Εικόνα 5.2-5: Θέση Β/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 1: μείωση της τιμής κατωφλιού της B2 (*threshold(2)*) από 0.84 σε 0.42 και σε 0.0.

Αντίστοιχα και στην θέση Β, παρατηρείται ότι συμβαίνει και στην θέση Α. Μείωση της τιμής κατωφλιού της συμπεριφοράς Β2 οδηγεί σε αύξηση της ενεργοποίησης της συμπεριφοράς Β2.



Εικόνα 5.2-6: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 1 : μείωση της τιμής κατωφλιού της Β2 (threshold(2)) από 0.84 σε 0.42.

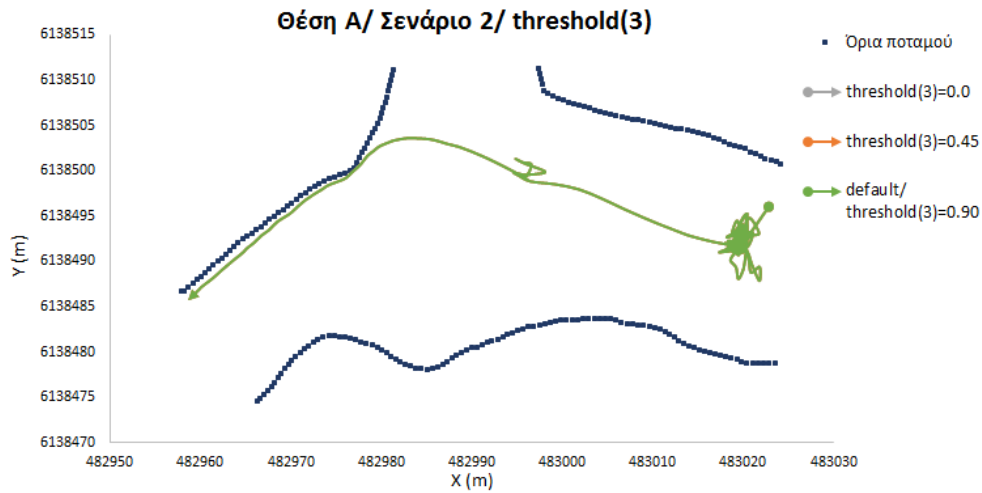


Εικόνα 5.2-7: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 1 : μείωση της τιμής κατωφλιού της Β2 (threshold(2)) από 0.84 σε 0.0.

Παρατηρείται αύξηση της συμπεριφοράς Β2 όσο μειώνεται η τιμή του κατωφλιού της Β2 και για το πλήθος των 100 θέσεων.

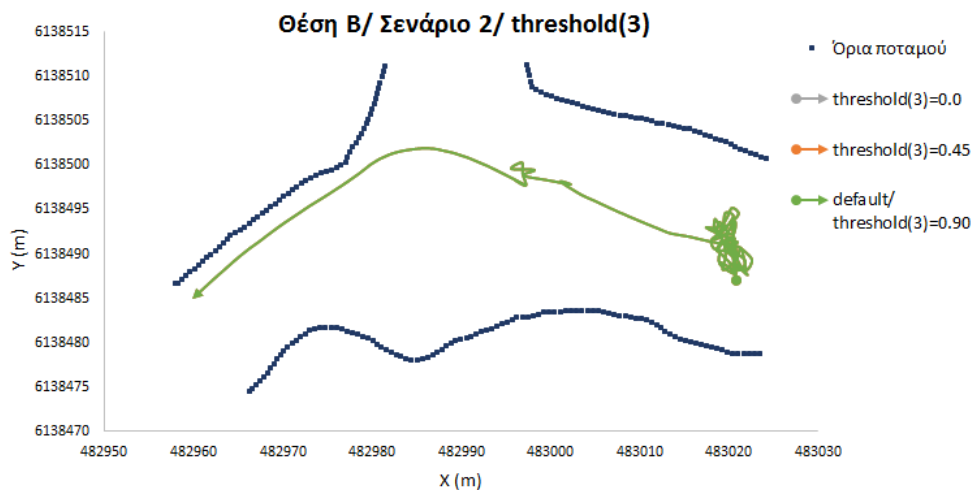
Σενάριο 2: Τιμή κατωφλιού συμπεριφοράς B3 (threshold(3))

Όλες οι τιμές των παραμέτρων παραμένουν ίδιες και αλλάζει μόνο η τιμή κατωφλιού για τη συμπεριφορά B3 (*threshold(3)*). Η αρχική τιμή της παραμέτρου είναι 0.90 μειώνεται πρώτα κατά 50% στην τιμή 0.45 και τέλος μέχρι να μηδενιστεί.



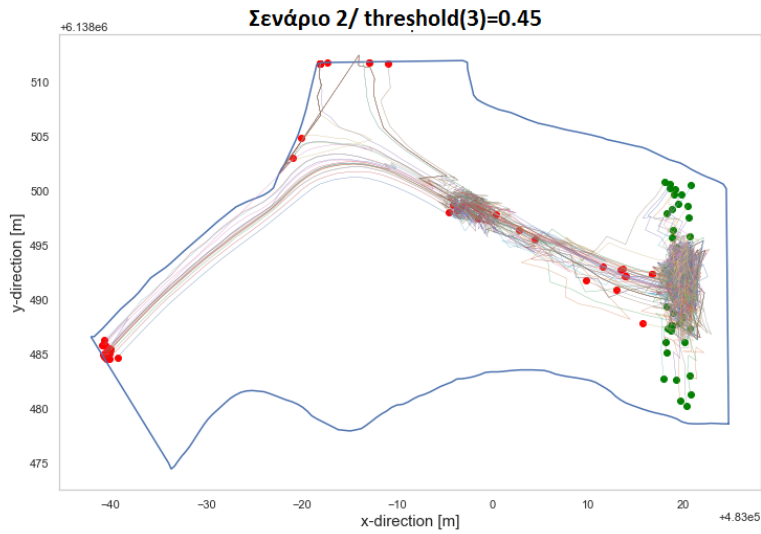
Εικόνα 5.2-8 : Θέση Α/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 2: μείωση της τιμής κατωφλιού της B3 (*threshold(3)*) από 0.90 σε 0.45 και σε 0.0.

Από την εικόνα 5.2-5 φαίνεται ότι οι μειώσεις στην τιμή κατωφλιού της συμπεριφοράς B3 δεν επιδρούν με κάποιο τρόπο στην πορεία του ιχθύος, αφού όλες οι τροχιές είναι ίδιες και δεν παρουσιάζεται καμία διαφορά μεταξύ τους. Οι τροχιές επειδή ακριβώς είναι ίδιες, επικαλύπτονται και δεν φαίνονται τα διαφορετικά χρώματα.

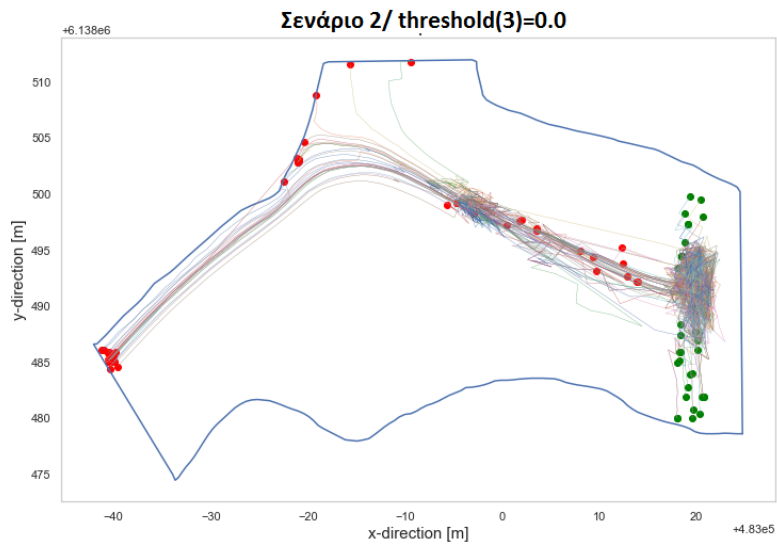


Εικόνα 5.2-9: Θέση Β/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 2: μείωση της τιμής κατωφλιού της B3 (*threshold(3)*) από 0.90 σε 0.45 και σε 0.0.

Επίσης στην θέση Β, από την εικόνα 5.2-6, παρατηρείται ακριβώς το ίδιο μοτίβο, όπως και στην θέση Α. Η αλλαγή της τιμής κατωφλιού της συμπεριφοράς B3 δεν επιδρά στην πορεία του ιχθύος. Οι τροχιές επειδή ακριβώς είναι ίδιες, επικαλύπτονται και δεν φαίνονται τα διαφορετικά χρώματα.



Εικόνα 5.2-10: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 2 : μείωση της τιμής κατωφλιού της B3 ($threshold(3)$) από 0.90 σε 0.45.

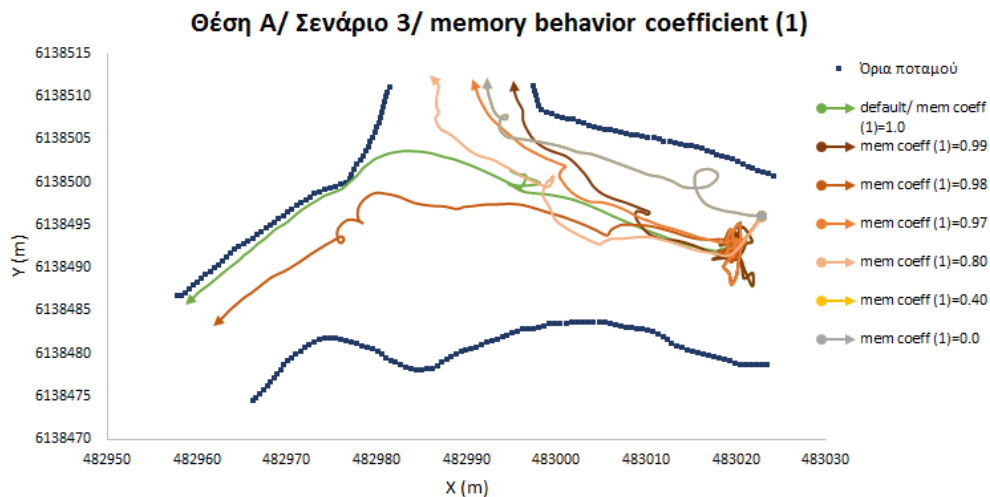


Εικόνα 5.2-11: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 2: μείωση της τιμής κατωφλιού της B3 ($threshold(3)$) από 0.90 σε 0.0.

Και στο σύνολο των 100 θέσεων εκκίνησης δεν παρατηρείται κάποια διαφορά στη μείωση της τιμής κατωφλιού της συμπεριφοράς B3.

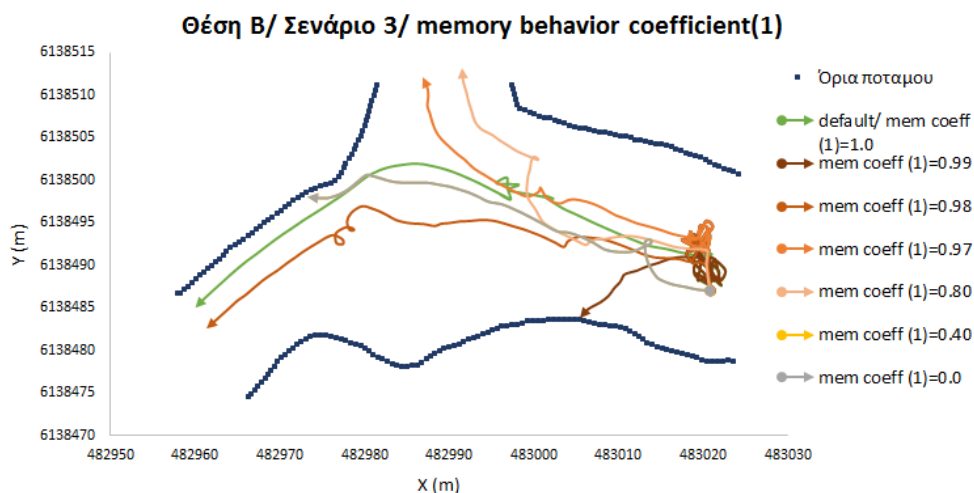
Σενάριο 3: Συντελεστής μνήμης συμπεριφοράς B1 (memory behavior coefficient(1))

Όλες οι τιμές των παραμέτρων παραμένουν ίδιες και αλλάζει μόνο η τιμή του συντελεστή μνήμης της συμπεριφοράς B1 (*memory behavior coefficient(1)*). Η αρχική τιμή της παραμέτρου είναι 1.0, μειώνεται πρώτα στην τιμή 0.99 και σταδιακά μειώνεται στις τιμές 0.98, 0.97, 0.80, 0.40 και τέλος μέχρι να μηδενιστεί.



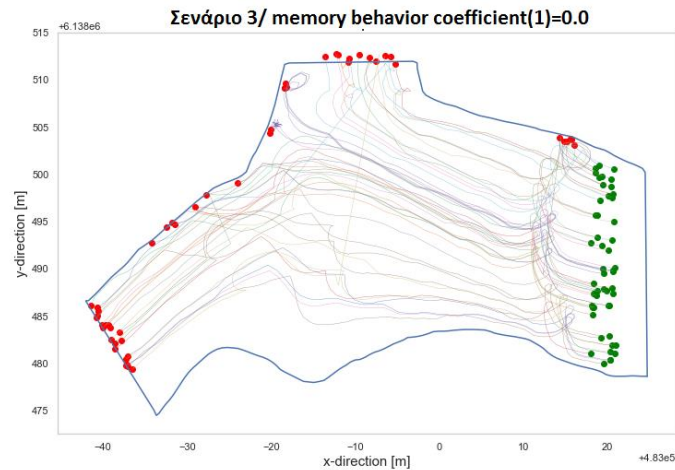
Εικόνα 5.2-12: Θέση A/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 3: μείωση του συντελεστή μνήμης της B1 (*memory behavior coefficient(1)*) από 1.0 σε 0.99, 0.98, 0.97, 0.80, 0.40 και σε 0.0.

Με την σταδιακή μείωση του συντελεστή μνήμης της συμπεριφοράς B1 παρατηρούνται αρκετά διαφορετικές τροχιές μεταξύ τους ακόμη και με ελάχιστη μείωση της τιμής σε 0.98. Για τιμές από 0.40 και μέχρι μηδενισμό του συντελεστή δεν σημειώνεται καμία αλλαγή. Γενικά, παρατηρείται αύξηση της συμπεριφοράς B1 έναντι της συμπεριφοράς B2 όσο μειώνεται η τιμή του συντελεστή μνήμης, δηλαδή πορεία του ιχθύος με την κατεύθυνση της ροής χωρίς ξαφνικές αλλαγές στην τροχιά, αφού μειώνονται και οι κυκλικές συμπεριφορές γύρω από μία περιοχή.



Εικόνα 5.2-13: Θέση B/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 3: μείωση του συντελεστή μνήμης της B1 (*memory behavior coefficient(1)*) από 1.0 σε 0.99, 0.98, 0.97, 0.80, 0.40 και σε 0.0.

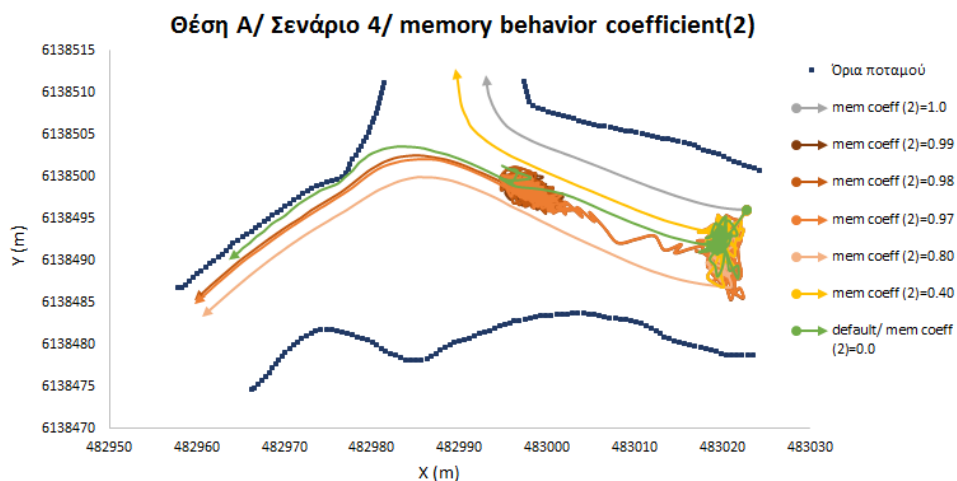
Και στην θέση Β, παρατηρούνται διαφορετικές τροχιές όπου με τη μείωση του συντελεστή μνήμης της συμπεριφοράς B1 αυξάνεται η συμπεριφορά B1 έναντι της συμπεριφοράς B2, αφού μειώνεται η συμπεριφορά με ξαφνικές αλλαγές κατεύθυνσης. Για τιμές από 0.40 και μέχρι μηδενισμό του συντελεστή δεν σημειώνεται και πάλι καμία αλλαγή, γι' αυτό οι δύο τροχιές δεν ξεχωρίζουν.



Εικόνα 5.2-14: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 3: μείωση του συντελεστή μνήμης της B1 (*memory behavior coefficient(1)*) από 1.0 σε 0.0.

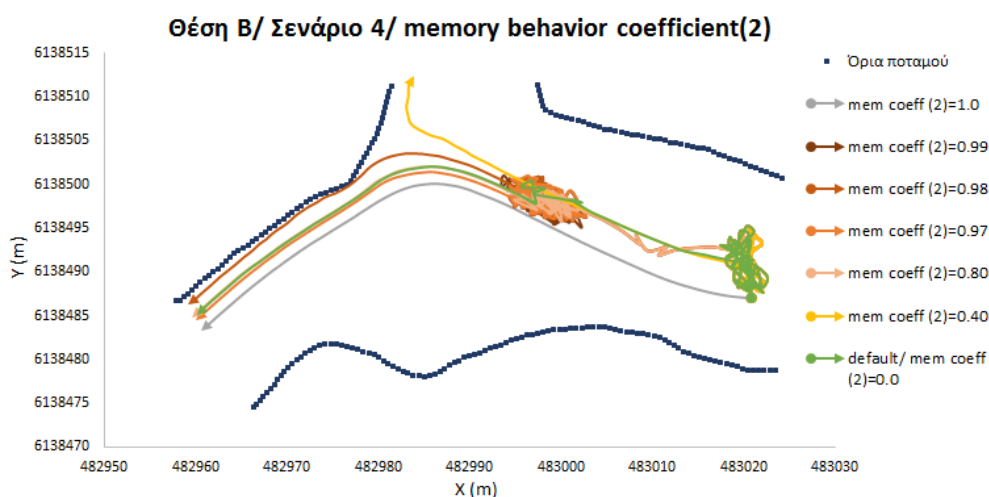
Όπως και στις δύο θέσεις Α και Β, έτσι και στις 100 θέσεις εκκίνησης οι ιχθύες ακολουθούν αποκλειστικά τη συμπεριφορά B1, δηλαδή δεν παρουσιάζουν ξαφνικές αλλαγές στην κατεύθυνση τους.

Σενάριο 4: Συντελεστής μνήμης συμπεριφοράς B2 (*memory behavior coefficient(2)*)
 Στο σενάριο αυτό, όλες οι τιμές των παραμέτρων παραμένουν ίδιες και αλλάζει μόνο η τιμή του συντελεστή μνήμης της συμπεριφοράς B2 (*memory behavior coefficient(2)*). Η αρχική τιμή της παραμέτρου είναι 0.0, αυξάνεται πρώτα στην τιμή 0.40 και σταδιακά αυξάνεται στις τιμές 0.80, 0.97, 0.98, 0.99 και τέλος μέχρι την τιμή 1.0.



Εικόνα 5.2-15: Θέση Α/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 4: αύξηση του συντελεστή μνήμης της B2 (*memory behavior coefficient(2)*) από 0.0 σε 0.40, 0.80, 0.97, 0.98, 0.99 και σε 1.0.

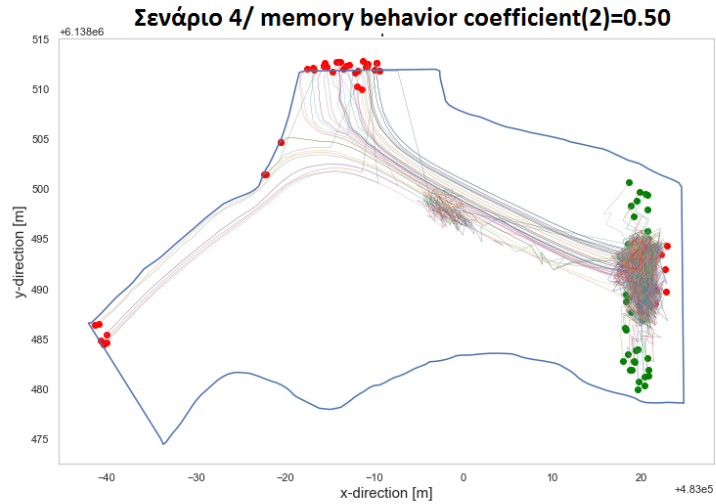
Στην αρχική αύξηση του συντελεστή μνήμης στην τιμή 0.40 από 0.0, παρατηρείται ότι παρόλο που και στις δύο τροχιές ο ιχθύς ακολουθεί κυκλική συμπεριφορά γύρω από μία περιοχή στην αρχή, για τιμή 0.40 ο ιχθύς συνεχίζει ευθεία πορεία. Παρόμοια συμπεριφορά ακολουθεί και για τιμή συντελεστή 0.80, όπου ακολουθεί κυκλική συμπεριφορά στην είσοδο της περιοχής μελέτης με τις υψηλότερες ταχύτητες ροής, ενώ στην υπόλοιπη διαδρομή μέχρι την έξοδο από την περιοχή μελέτης συνεχίζει με ευθεία πορεία. Για περαιτέρω αύξηση στις τιμές 0.97 και 0.98, ο ιχθύς παρουσιάζει κυκλική συμπεριφορά και στην είσοδο της περιοχής μελέτης και στη μέση περίπου, εκεί που εμφανίζονται οι υψηλότερες ταχύτητες νερού. Για τιμή συντελεστή 0.99 η τροχιά παρουσιάζει μόνο κυκλικές συμπεριφορές, χωρίς να συνεχίζει προς κάποια κατεύθυνση ο ιχθύς. Τέλος, για μέγιστη τιμή 1.0 του συντελεστή μνήμης ο ιχθύς ακολουθεί αποκλειστικά ευθεία πορεία προς την είσοδο του fish farm. Ουσιαστικά για τιμή 1.0 υποδεικνύει ότι ο ιχθύς ακολουθεί μόνο τη συμπεριφορά B1.



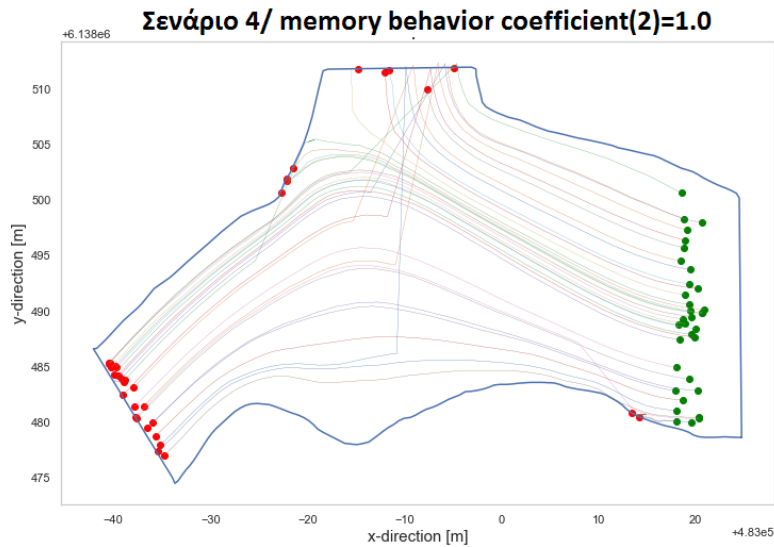
Εικόνα 5.2-16: Θέση B/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 4: αύξηση του συντελεστή μνήμης της B2 (memory behavior coefficient(2)) από 0.0 σε 0.40, 0.8, 0.97, 0.98, 0.99 και σε 1.0.

Όσον αφορά την θέση B, στην τροχιά με την τιμή συντελεστή 0.40 παρατηρείται κυκλική συμπεριφορά στην αρχή και στη συνέχεια ευθεία πορεία μέχρι το τέλος. Στις τροχιές με τιμές συντελεστή από 0.80 μέχρι 0.99 παρατηρείται αύξηση της κυκλικής συμπεριφοράς, όπου στην τροχιά με 0.99 ο ιχθύς δεν συνεχίζει προς κάποια πορεία. Αντίθετα, με μέγιστη τιμή συντελεστή μνήμης 1.0 η τροχιά του ιχθύος προκύπτει ευθεία χωρίς αλλαγές, το οποίο αντιστοιχεί σε αποκλειστική ενεργοποίηση της συμπεριφοράς B1 και μηδενική παρουσία της συμπεριφοράς B2.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του συντελεστή της B2, τόσο για την θέση A όσο και για την θέση B, έρχονται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα του συντελεστή της B1, καθώς αυξάνονται οι κυκλικές συμπεριφορές όσο αυξάνεται ο συντελεστής της B2. Βέβαια, για μέγιστη τιμή 1.0 του συντελεστή της B2, η B2 δεν ενεργοποιείται καθόλου.



Εικόνα 5.2-17: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 4: αύξηση του συντελεστή μνήμης της B2 (memory behavior coefficient(2)) από 0.0 σε 0.50.

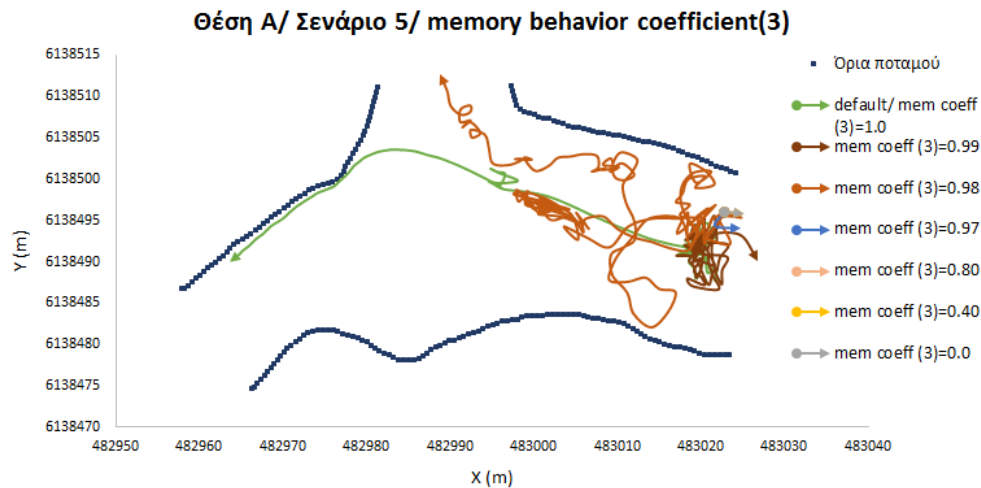


Εικόνα 5.2-18: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 4: αύξηση του συντελεστή μνήμης της B2 (memory behavior coefficient(2)) από 0.0 σε 1.0.

Για μέγιστη τιμή 1.0 του συντελεστή μνήμης της συμπεριφοράς B2 απενεργοποιείται η συμπεριφορά B2 και στις 100 θέσεις εκκίνησης.

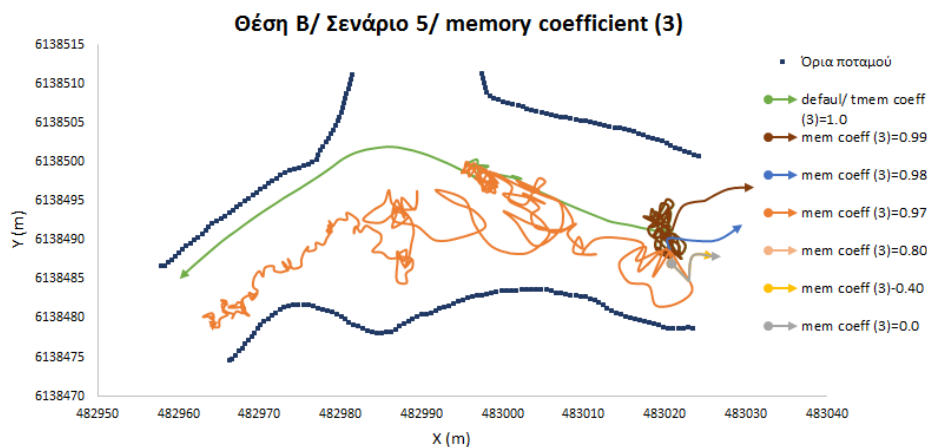
Σενάριο 5: Συντελεστής μνήμης συμπεριφοράς B3 (memory behavior coefficient(3))

Στο σενάριο αυτό, όλες οι τιμές των παραμέτρων παραμένουν ίδιες και αλλάζει μόνο η τιμή του συντελεστή μνήμης της συμπεριφοράς B3 (*memory behavior coefficient(3)*). Η αρχική τιμή της παραμέτρου είναι 1.0, μειώνεται πρώτα στην τιμή 0.99 και σταδιακά μειώνεται στις τιμές 0.98, 0.97, 0.80, 0.40 και τέλος μέχρι την τιμή 0.0.



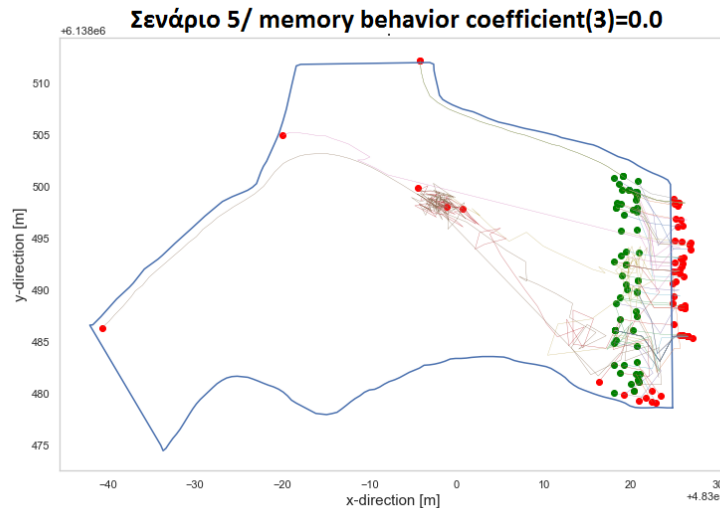
Εικόνα 5.2-19: Θέση Α/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 5: μείωση του συντελεστή μνήμης της B3 (*memory behavior coefficient(3)*) από 1.0 σε 0.99, 0.98, 0.97, 0.80, 0.40 και σε 0.0.

Από την εικόνα 5.2-11 παρατηρείται ότι όσο μειώνεται η τιμή του συντελεστή μνήμης από τη μονάδα προς το μηδέν τόσο μειώνονται οι κυκλικές συμπεριφορές γύρω από μία περιοχή και τόσο αυξάνεται η ενεργοποίηση αποκλειστικά της συμπεριφοράς B3. Η συμπεριφορά B3 αντιστοιχεί σε κατάσταση διαφυγής και πορεία του ιχθύος προς την αντίθετη κατεύθυνση της ροής, γεγονός που φαίνεται κυρίως με μείωση του συντελεστή από 0.97 μέχρι 0.0 και ακόμα περισσότερο για την τιμή 0.0 όπου απλά ο ιχθύς γυρνάει απευθείας αντίθετα. Στις τροχιές με τιμή συντελεστή 0.99 και 0.98 παρατηρείται ενεργοποίηση και της συμπεριφοράς B2. Οι τροχιές για τις τιμές συντελεστή από 0.80 έως 0.0 είναι ίδιες και γι' αυτό δεν ξεχωρίζουν.

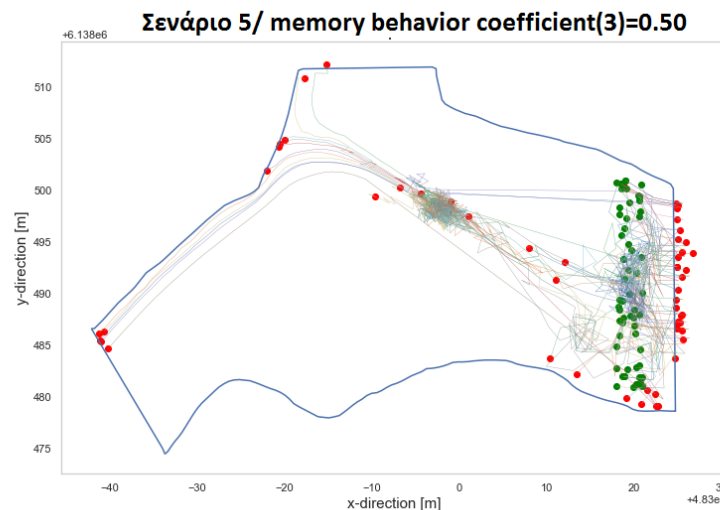


Εικόνα 5.2-20: Θέση Β/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 5: μείωση του συντελεστή μνήμης της B3 (*memory behavior coefficient(3)*) από 1.0 σε 0.99, 0.98, 0.97, 0.80, 0.40 και σε 0.0.

Και από την θέση Β παρατηρούμε ότι ο ιχθύς στρέφεται αντίθετα στη ροή όσο μειώνεται η τιμή του συντελεστή μνήμης, που σημαίνει ότι όσο τείνει στην τιμή 0.0 τόσο περισσότερο ενεργοποιείται η συμπεριφορά Β3. Διαφορές διακρίνονται στις τροχιές μεταξύ των τιμών 0.99, 0.98 και 0.97 παρότι απέχουν μόλις 0.01. Στις τροχιές με τιμή συντελεστή 0.97 και 0.99 ενεργοποιείται και η συμπεριφορά Β2. Οι τροχιές για τιμές μικρότερες από 0.97 ολοκληρώνονται μέσα σε πολύ λίγα βήματα αντίθετα από την κατεύθυνση ροής. Τέλος, οι τροχιές για τις τιμές συντελεστή από 0.80 έως 0.0 είναι ίδιες και γι' αυτό δεν ξεχωρίζουν.



Εικόνα 5.2-21: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 5: μείωση του συντελεστή μνήμης της Β3 (memory behavior coefficient(3)) από 1.0 σε 0. 0.

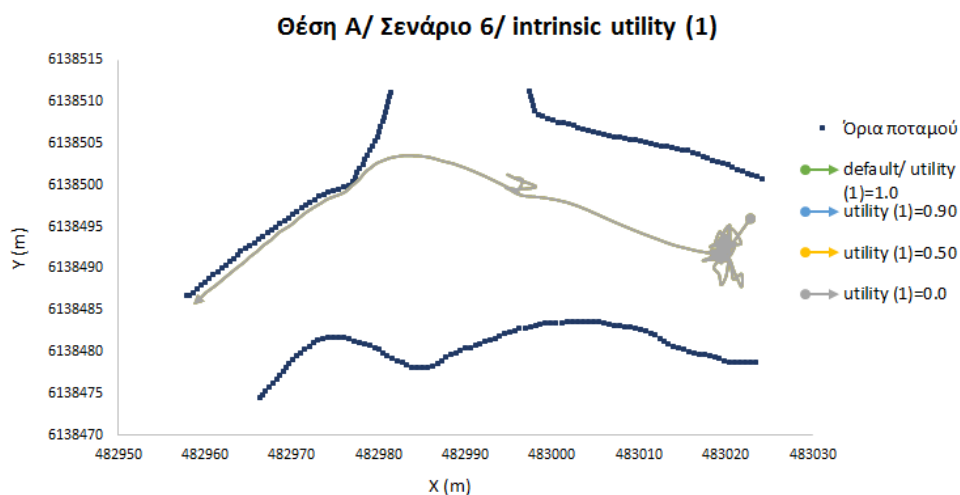


Εικόνα 5.2-22: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 5: μείωση του συντελεστή μνήμης της Β3 (memory behavior coefficient(3)) από 1.0 σε 0.40

Και στο σύνολο των θέσεων εκκίνησης παρατηρείται μείωση της κυκλικής συμπεριφοράς και αύξηση της κατεύθυνσης των ιχθύων αντίθετα στη ροή, δηλαδή αυξάνεται η συμπεριφορά Β3 όσο η τιμή του συντελεστή μνήμης της Β2 τείνει προς 0.0.

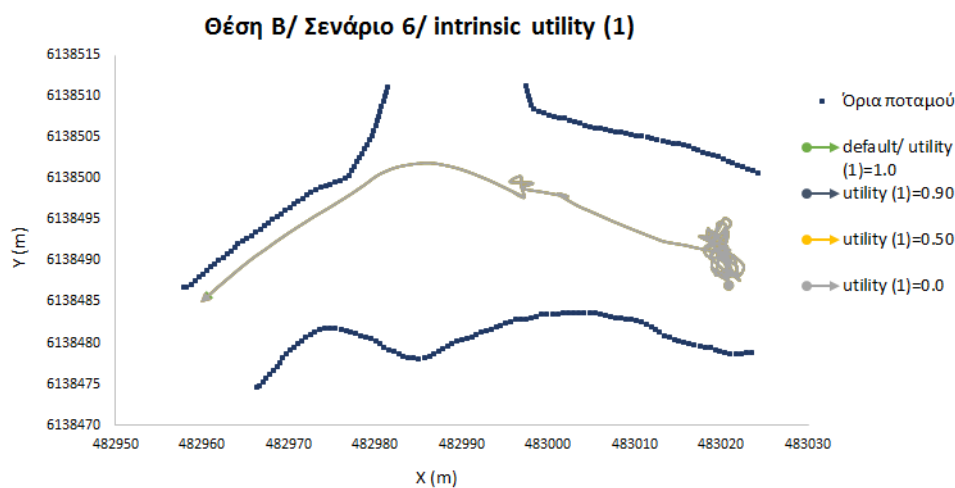
Σενάριο 6: Συντελεστής εσωτερικής χρησιμότητας (intrinsic utility (1))

Στο σενάριο αυτό, όλες οι τιμές των παραμέτρων παραμένουν ίδιες και αλλάζει μόνο η τιμή του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας της συμπεριφοράς B1 (intrinsic utility (1)). Η αρχική τιμή της παραμέτρου είναι 1.0, μειώνεται πρώτα στην τιμή 0.90, στη συνέχεια σε 0.50 και τέλος μέχρι την τιμή 0.0.



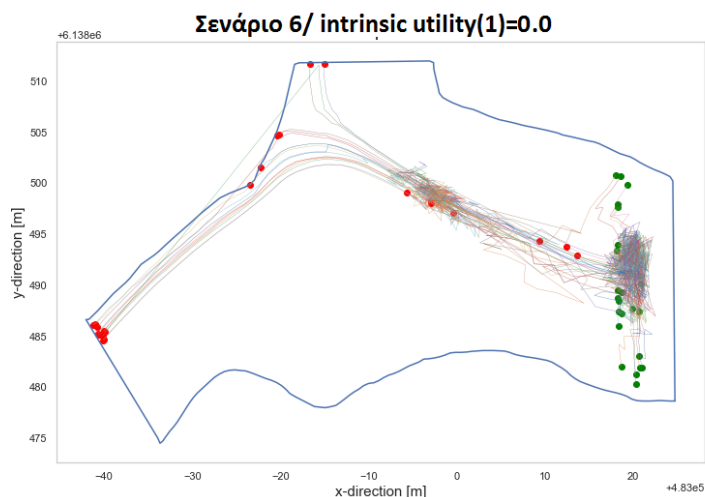
Εικόνα 5.2-23: Θέση Α/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 6: μείωση του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας της B1 (intrinsic utility (1)) από 1.0 σε 0.90, 0.50 και σε 0.0.

Από την εικόνα 5.2-13 φαίνεται ότι η αλλαγή στην τιμή του συντελεστή της εσωτερικής χρησιμότητας δεν επηρεάζει καθόλου τις τροχιές του ιχθύος, αφού προκύπτουν όλες ίδιες.



Εικόνα 5.2-24: Θέση Β/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 6: μείωση του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας της B1 (intrinsic utility (1)) από 1.0 σε 0.90, 0.50 και σε 0.0.

Αντίστοιχα και από την θέση Β η μείωση του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας δεν επιφέρει καμία αλλαγή στις τροχιές του ιχθύος.

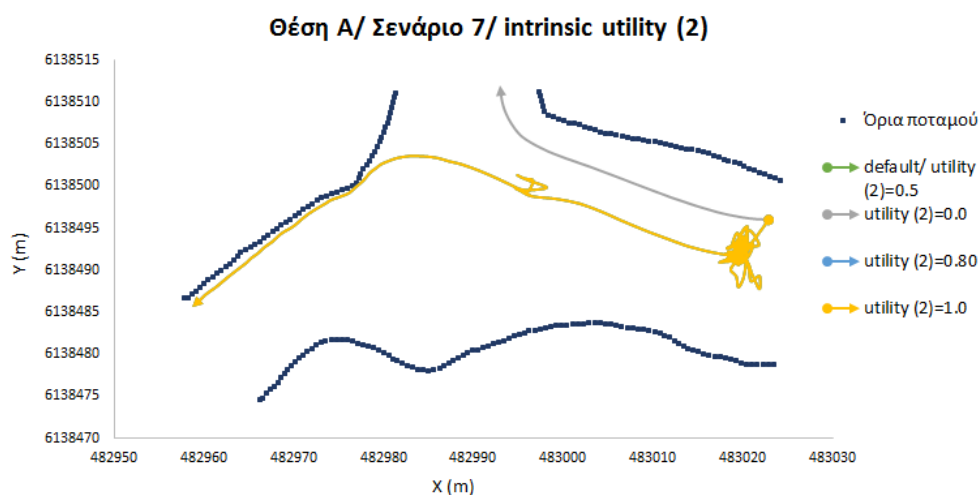


Εικόνα 5.2-25: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 6: μείωση του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας της B1 (*intrinsic utility (1)*) από 1.0 σε 0.0.

Δεν παρατηρείται αλλαγή στις τροχιές των 100 θέσεων εκκίνησης για μηδενισμό της εσωτερικής χρησιμότητας της συμπεριφοράς B1.

Σενάριο 7: Συντελεστής εσωτερικής χρησιμότητας (*intrinsic utility (2)*)

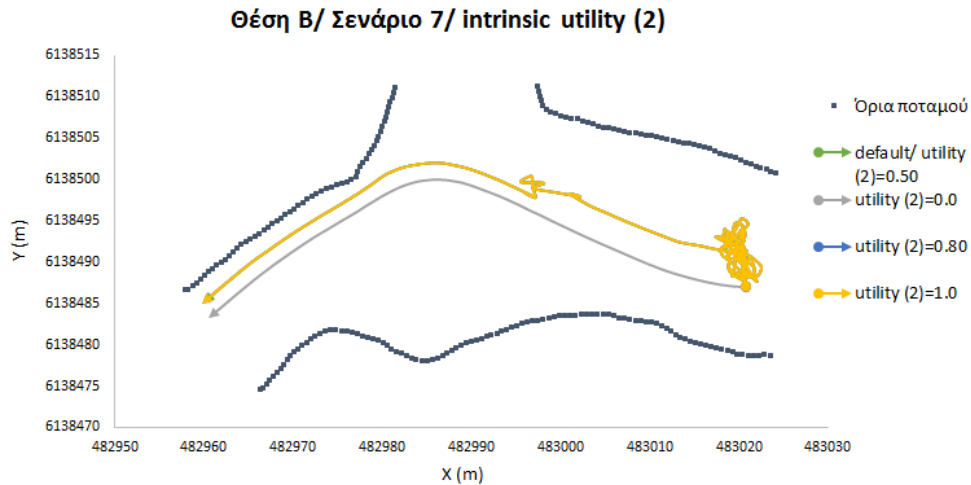
Στο σενάριο αυτό, όλες οι τιμές των παραμέτρων παραμένουν ίδιες και αλλάζει μόνο η τιμή του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας της συμπεριφοράς B2 (*intrinsic utility coefficient(2)*). Η αρχική τιμή της παραμέτρου είναι 0.5, μειώνεται πρώτα στην τιμή 0.0, στη συνέχεια αυξάνεται σε 0.80 και τέλος μέχρι την μέγιστη τιμή 1.0.



Εικόνα 5.2-26: Θέση A/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 7: αύξηση του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας της B2 (*intrinsic utility (2)*) από 0.5 σε 0.80 και 1. 0 και μείωση σε 0.0.

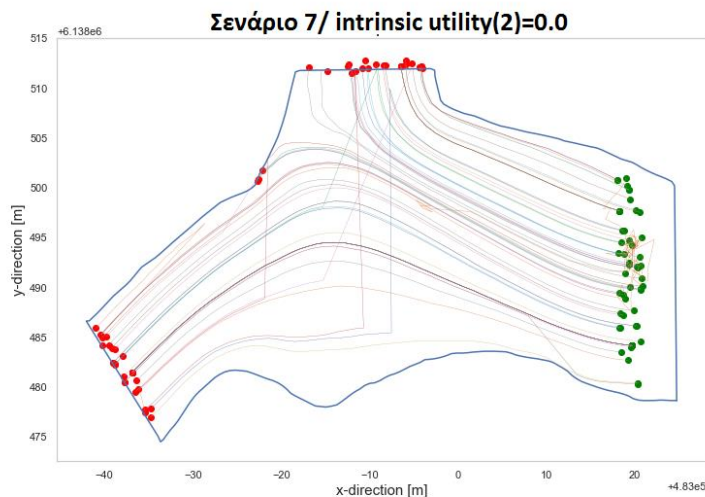
Από την εικόνα 5.2-14 παρατηρείται ότι για τις τιμές 0.80 και 1.0 του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας της B2 οι τροχιές του ιχθύος είναι ίδιες με την αρχική τιμή του συντελεστή 0.50. Μεγάλη αλλαγή στην τροχιά του ιχθύος παρουσιάζεται για μηδενισμό της τιμής της χρησιμότητας. Η τροχιά δεν παρουσιάζει καμία ξαφνική

αλλαγή αλλά παραμένει μόνο ευθεία. Ουσιαστικά ο μηδενισμός της εσωτερικής χρησιμότητας της συμπεριφοράς B2 υποδεικνύει στον ιχθύ να μην ακολουθήσει αυτή την συμπεριφορά, άρα επιλέγει να ακολουθήσει την B1, γεγονός που φαίνεται από την ευθεία τροχιά.



Εικόνα 5.2-27: Θέση B/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 7: αύξηση του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας της B2 (intrinsic utility (2)) από 0.5 σε 0.80 και 1.0 και μείωση σε 0.0.

Ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα προκύπτουν και για την θέση B. Η τροχιά του ιχθύος αλλάζει μόνο όταν μηδενίζεται η τιμή του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας. Όπως αναφέρεται και για την θέση A, η ευθεία πορεία που διαγράφει ο ιχθύς για μηδενισμό της χρησιμότητας υποδεικνύει ότι ενεργοποιείται μόνο η συμπεριφορά B1 και καθόλου η συμπεριφορά B2.

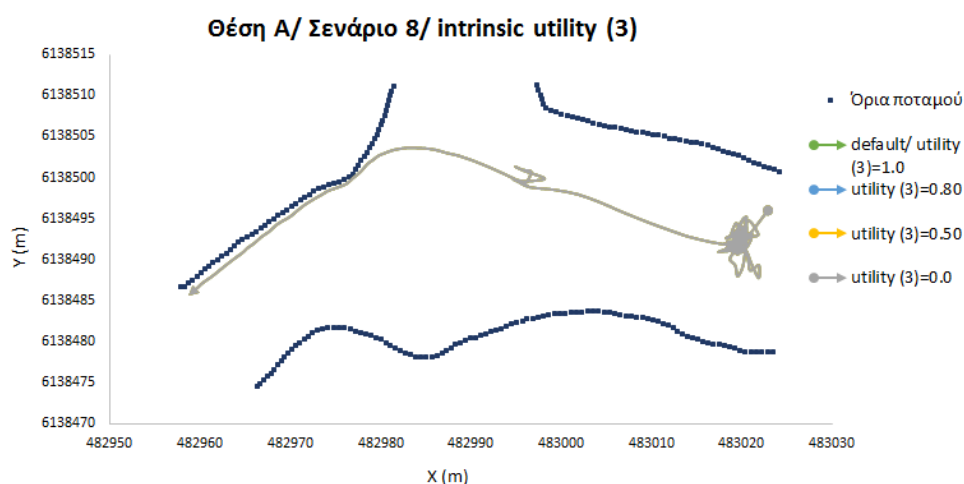


Εικόνα 5.2-28: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 7: μείωση της τιμής της εσωτερικής χρησιμότητας της B2 (intrinsic utility (2)) από 0.5 σε 0.0.

Ο μηδενισμός της εσωτερικής χρησιμότητας της συμπεριφοράς B2 οδηγεί τους ιχθύες να μην ακολουθήσουν τη συμπεριφορά αυτή αλλά τη συμπεριφορά B1 με ευθείες τροχιές.

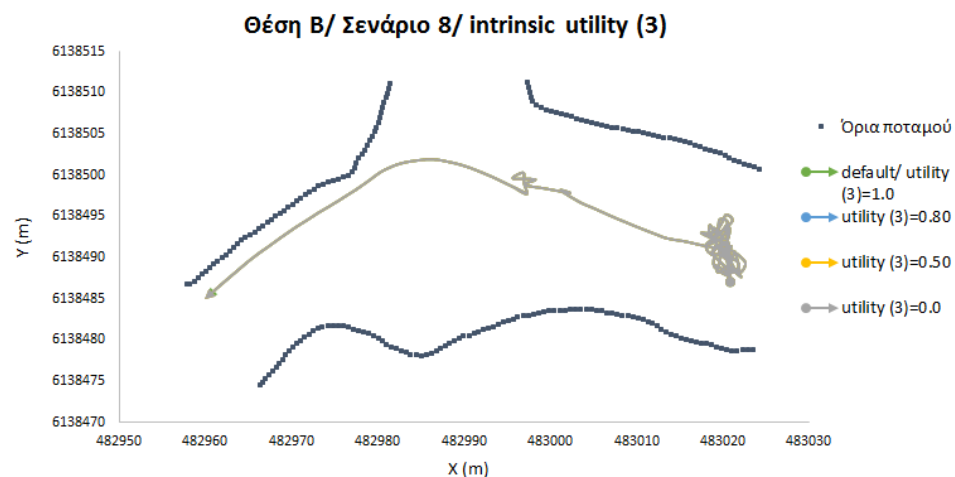
Σενάριο 8: Συντελεστής εσωτερικής χρησιμότητας (intrinsic utility coefficient(3))

Στο σενάριο αυτό, όλες οι τιμές των παραμέτρων παραμένουν ίδιες και αλλάζει μόνο η τιμή του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας της συμπεριφοράς B3 (*intrinsic utility coefficient(3)*). Η αρχική τιμή της παραμέτρου είναι 1.0, μειώνεται πρώτα στην τιμή 0.80, στη συνέχεια σε 0.50 και τέλος μέχρι την τιμή 0.0.



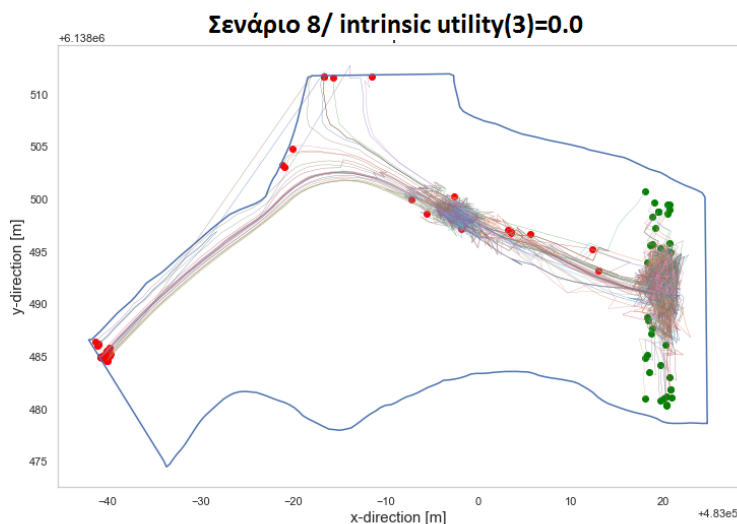
Εικόνα 5.2-29: Θέση Α/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 8: μείωση του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας της B2 (*intrinsic utility (2)*) από 1.0 σε 0.80, 0.50 και σε 0.0.

Παρατηρείται ότι οι αλλαγές της τιμής της εσωτερικής χρησιμότητας της συμπεριφοράς B3, είτε μείωση είτε αύξηση, δεν επιδρούν καθόλου στις τροχιές του ιχθύος όπως ακριβώς συμβαίνει και στην περίπτωση του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας της B1.



Εικόνα 5.2-30: Θέση Β/ Τροχιές ιχθύων / Σενάριο 8: μείωση του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας της B3 (*intrinsic utility (3)*) από 1.0 σε 0.80, 0.50 και σε 0.0.

Και για την θέση εκκίνησης Β του ιχθύος δεν εμφανίζεται κάποια αλλαγή με τις αυξομειώσεις της τιμής του συντελεστή της εσωτερικής χρησιμότητας της συμπεριφοράς B3.



Εικόνα 5.2-31: 100 θέσεις εκκίνησης/ Σενάριο 8: μείωση της τιμής της εσωτερικής χρησιμότητας της B2 (intrinsic utility (2)) από 1.0 σε 0.0.

Οι αλλαγές στην τιμή της εσωτερικής χρησιμότητας της συμπεριφοράς B3 δεν έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετικές τροχιές και για τις 100 θέσεις εκκίνησης των ιχθύων.

Από την ανάλυση ευαισθησίας προκύπτει ότι οι σημαντικότερες παράμετροι είναι οι συντελεστές μνήμης και για τις τρεις συμπεριφορές B1, B2, B3 (memory behavior coefficient(1, 2, 3)) και η τιμή κατωφλιού της συμπεριφοράς B2 (threshold(2)), καθώς με την ελάχιστη αλλαγή στις τιμές τους εμφανίζονται αρκετά διαφορετικές τροχιές. Επίσης, πολύ βασικό ρόλο παίζει και η θέση εκκίνησης του ιχθύος, αφού διαφορετική θέση έχει ως αποτέλεσμα διαφορετική τροχιά. Πιο συγκεκριμένα:

- Κατώφλι συμπεριφοράς B2 (threshold(2)). Η τιμή αυτή αντιπροσωπεύει το κατώφλι που πρέπει να ξεπεράσει ο δείκτης ανίχνευσης ώστε ο ιχθύς να συνειδητοποιήσει το ερέθισμα και να ενεργοποιηθεί κάποια συμπεριφορά. Η αυξανόμενη μείωση της τιμής του κατωφλιού οδηγεί σε αυξανόμενη ενεργοποίηση της συμπεριφοράς B2.
- Συντελεστής μνήμης της συμπεριφοράς B1 (memory behavior coefficient(1)). Αντιπροσωπεύει, όπως και οι υπόλοιποι συντελεστές μνήμης, το ποσό της πληροφορίας από την προηγούμενη κατάσταση που ενσωματώνεται στην επόμενη απόφαση. Όσο μειώνεται ο συντελεστής από τη μονάδα στο μηδέν τόσο περισσότερο αυξάνεται η συμπεριφορά B1. Με εξαίρεση τις τιμές 0.99, 0.98 και 0.97 όπου παρατηρείται αυξανόμενη ενεργοποίηση και της συμπεριφοράς B2.
- Συντελεστής μνήμης της συμπεριφοράς B2 (memory behavior coefficient(2)). Αυξανόμενη ενεργοποίηση της συμπεριφοράς παρατηρείται κυρίως για τιμές συντελεστή 0.99, 0.98 και 0.97. Ενεργοποίηση της B2 παρατηρείται και σε χαμηλότερες τιμές του συντελεστή αλλά σε μικρότερο βαθμό. Για μέγιστη τιμή 1.0 η συμπεριφορά B2 δεν εμφανίζεται καθόλου.
- Συντελεστής μνήμης της συμπεριφοράς B3 (memory behavior coefficient(3)). Γενικά η μείωση του συντελεστή οδηγεί σε αυξανόμενη εμφάνιση της B3 και

κυρίως για μηδενική τιμή όπου ο ιχθύς πρακτικά εξέρχεται κατευθείαν από την περιοχή μελέτης. Με εξαίρεση, όπως και στις άλλες περιπτώσεις, την ενεργοποίηση της συμπεριφοράς B2 για τιμές συντελεστή 0.99 και 0.98.

Η φυσική σημασία των συντελεστών μνήμης κάθε συμπεριφοράς μπορεί να αντιστοιχηθεί στην διατήρηση της μνήμης μιας συμπεριφοράς από το προηγούμενο βήμα στο επόμενο. Από την ανάλυση φαίνεται ότι όσο χαμηλότερη είναι η τιμή του συντελεστή μνήμης τόσο περισσότερο ο ιχθύς 'θυμάται' και έχει μεγαλύτερες πιθανότητες να συνεχίσει να διατηρεί την ίδια συμπεριφορά και στα επόμενα βήματα.

Όσον αφορά τη φυσική σημασία του κατώφλιού της συμπεριφοράς B2, η τιμή αυτή αποτελεί το οριακό σημείο στην αλλαγή του μεγέθους της επιτάχυνσης για αυτό και ονομάζεται κατώφλι. Ουσιαστικά μόλις ξεπεραστεί το κατώφλι αυτό ο ιχθύς αντιλαμβάνεται την αλλαγή στην επιτάχυνση που δέχεται. Μέχρι το κατώφλι δεν αντιλαμβάνεται αλλαγή, οπότε δεν επιλέγει να ακολουθήσει κάποια από τις συμπεριφορές που αντιστοιχούν στην αλλαγή επιτάχυνσης, δηλαδή την B2 ή την B3. Όταν ξεπεραστεί το κατώφλι, τότε η χρησιμότητα της εκάστοτε συμπεριφοράς αυξάνεται, διαφορετικά μειώνεται. Η χρησιμότητα των συμπεριφορών παρουσιάζει διακύμανση καθώς ο ιχθύς περνά από το πεδίο ροής. Εν τέλει, η συμπεριφορά με τη μέγιστη χρησιμότητα ενεργοποιείται.

Για την εφαρμογή του μοντέλου ιχθύος, η οποία περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο, γίνεται χρήση των παραπάνω αποτελεσμάτων που προκύπτουν και με βάση το κατώφλι της συμπεριφοράς B2 και τους συντελεστές μνήμης για τις τρεις συμπεριφορές εξετάζεται η προσομοίωση των πειραματικών τροχιών των εξεταζόμενων ιχθύων και κατά πόσο μπορεί να επιτευχθεί η συμπεριφορά τους με την κατάλληλη προσαρμογή των συντελεστών αυτών. Η συμπεριφορά των πειραματικών ιχθύων χωρίζεται σε κυκλική γύρω από κάποιες περιοχές ή αλλιώς τροχιές με ξαφνικές αλλαγές κατεύθυνσης (milling) και σε μη κυκλική συμπεριφορά ή διαφορετικά σε ευθείες τροχιές χωρίς αλλαγές κατεύθυνσης (non-milling).

5.2.2. Εφαρμογή του μοντέλου ιχθύος για προσομοίωση των πειραματικών τροχιών

Στην έρευνα των Svendsen et al. (2011) το σύνολο των εξεταζόμενων ιχθύων είναι 61. Από το σύνολο των 61 ιχθύων, οι 41 ιχθύες πιάστηκαν στην παγίδα τύπου Wolf που είχε τοποθετηθεί κατάντη της περιοχής μελέτης και οι υπόλοιποι 20 ιχθύες δεν πιάστηκαν στην παγίδα. Από τους 41 ιχθύες, οι 14 (που αντιστοιχεί στο 34% των 41 ιχθύων) πέρασαν πολλές φορές από την περιοχή που καλύπτουν τα υδρόφωνα, δηλαδή παρουσίασαν κυκλική συμπεριφορά γύρω από μία περιοχή ή τροχιές με ξαφνικές αλλαγές στην κατεύθυνση (*milling*) πολλές φορές μέσα στην περιοχή αυτή, οι υπόλοιποι 27 (που αντιστοιχεί στο 66% των 41 ιχθύων) πέρασαν μόνο 1 φορά από την περιοχή των υδροφώνων ακολουθώντας ευθεία πορεία χωρίς αλλαγές κατεύθυνσης (*non milling*). Από τους υπόλοιπους 20 ιχθύες που δεν πέρασαν στην παγίδα, οι 4 κατέληξαν στην περιοχή απομείωσης νερού στην είσοδο του fish farm και οι 16 κατέληξαν αλλού.

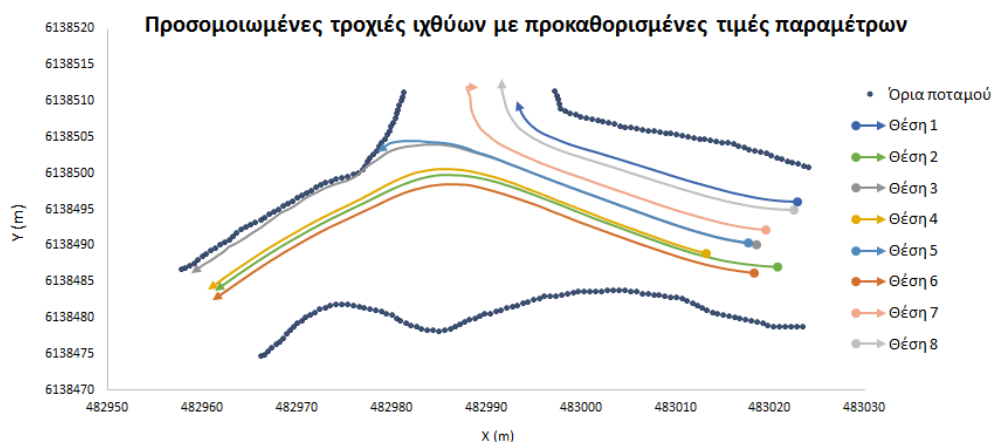
Μετά την ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων, εφαρμόζεται το μοντέλο ώστε να γίνει προσπάθεια προσομοίωσης της συμπεριφοράς των 41 μελετώμενων ιχθύων. Σκοπός της εφαρμογής του μοντέλου είναι να προσομοιώσει το σύνολο των ιχθύων, όπου το 66% του συνόλου θα ακολουθεί ευθεία πορεία και το 34% θα παρουσιάζει κυκλική συμπεριφορά ή ξαφνικές αλλαγές στην κατεύθυνση. Στο μοντέλο ιχθύων, η συμπεριφορά του ιχθύ να ακολουθεί ευθεία πορεία αντιστοιχεί αποκλειστικά στη συμπεριφορά B1, ενώ η κυκλική συμπεριφορά αντιστοιχεί σε συνδυασμό των συμπεριφορών B1, B2 και B3 και κυρίως της B2. Με άλλα λόγια, ο στόχος της εφαρμογής του μοντέλου είναι να πετύχει σε σύνολο 100 ιχθύων, την αποκλειστική συμπεριφορά B1 σε 66 ιχθύες και συνδυασμό των συμπεριφορών B1, B2 και B3 σε 34 ιχθύες.

Αρχικά, πραγματοποιείται προσομοίωση σε σύνολο 100 ιχθύων με τις προκαθορισμένες τιμές παραμέτρων. Στους 100 ιχθύες αλλάζει επίσης ο παράγοντας τυχαιότητας (*random*) που παίρνει διαφορετικές τιμές για κάθε ιχθύ. Ο παράγοντας τυχαιότητας λαμβάνει τιμές από μία ομοιόμορφη συνεχή κατανομή μεταξύ 0 και 1. Οι θέσεις εκκίνησης που χρησιμοποιούνται σε όλες τις προσομοιώσεις επιλέγονται από τις πειραματικές τροχιές των μελετώμενων ιχθύων με την προϋπόθεση ότι οι θέσεις ξεκινούν μέσα στην περιοχή μελέτης διότι το μοντέλο δεν λειτουργεί με θέση εκκίνησης εκτός της περιοχής μελέτης. Από κάθε θέση εκκίνησης 'αφήνονται' 100 ιχθύες ταυτόχρονα. Οι συντεταγμένες των 21 συνολικών θέσεων δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.2-2: Θέσεις εκκίνησης ιχθύων οι οποίες προέρχονται από τις πειραματικές τροχιές και χρησιμοποιούνται σε όλες τις προσομοιώσεις της εφαρμογής του μοντέλου.

ΘΕΣΕΙΣ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΙΧΘΥΩΝ		
A/A	X (m)	Y (m)
1	483022.53	6138494.9
2	483019.61	6138492.15
3	483022.83	6138496
4	483020.78	6138487.01
5	483018.58	6138490.07
6	483017.69	6138490.36
7	483018.35	6138486.16
8	483019.66	6138491.96
9	483012.37	6138492.4
10	483022.59	6138494.21
11	483016.32	6138489.81
12	483019.04	6138493
13	483017.8	6138486.52
14	483014.26	6138490.97
15	483023.44	6138489.46
16	483018.35	6138486.14
17	483013.36	6138492.42
18	483013.29	6138488.97
19	483021.56	6138490.71
20	483016.55	6138489.89
21	483023.42	6138494.15

Από την πρώτη προσομοίωση με τις προκαθορισμένες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου (που δίνονται στον πίνακα 5.2-1) προκύπτει ότι από το σύνολο των 100 ιχθύων οι 99 ιχθύες ακολουθούν ευθεία πορεία χωρίς αλλαγές,. Μερικές τροχιές που προκύπτουν παρουσιάζονται στην εικόνα 5.2-18. Η κουκκίδα αντιστοιχεί στην θέση εκκίνησης και το βέλος στην τελική.



Εικόνα 5.2-32: Προσομοιωμένες τροχιές ιχθύων με θέσεις εκκίνησης αυτές των πειραματικών τροχιών και με τις προκαθορισμένες τιμές στις παραμέτρους του μοντέλου (default).

Όπως αναφέρεται στην ανάλυση ευαισθησίας οι πιο σημαντικοί παράμετροι που προκύπτουν είναι οι 3 συντελεστές μνήμης κάθε συμπεριφοράς και το κατώφλι της συμπεριφοράς B2. Η εφαρμογή του μοντέλου πραγματοποιείται μετά από δοκιμές διαφόρων τιμών σε κάθε παράμετρο από τις 4 παραπάνω όπου καθορίζονται οι τελικές τιμές τους που έχουν ως αποτέλεσμα να προκύπτουν τα αντίστοιχα ποσοστά κάθε συμπεριφοράς. Προσομοιώνονται ταυτόχρονα συνολικά 100 ιχθύες σε κάθε μία από τις 21 θέσεις εκκίνησης που βρίσκονται στον πίνακα 5.2-2

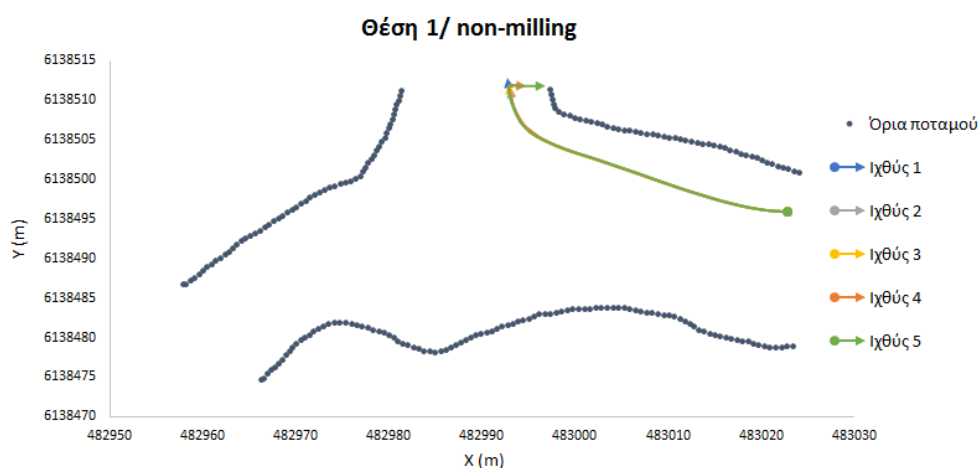
Για τις θέσεις οι παράμετροι που επιλέγονται διαμορφώνονται ως εξής:

Πίνακας 5.2-3: Τιμές παραμέτρων που επιλέγονται για την εφαρμογή του μοντέλου ιχθύων.

Παράμετρος	Τιμή παραμέτρου
Συντελεστής μνήμης συμπεριφοράς B1	1.00
Συντελεστής μνήμης συμπεριφοράς B2	0.82
Συντελεστής μνήμης συμπεριφοράς B3	0.99
Τιμή κατωφλίου συμπεριφοράς B2	0.25

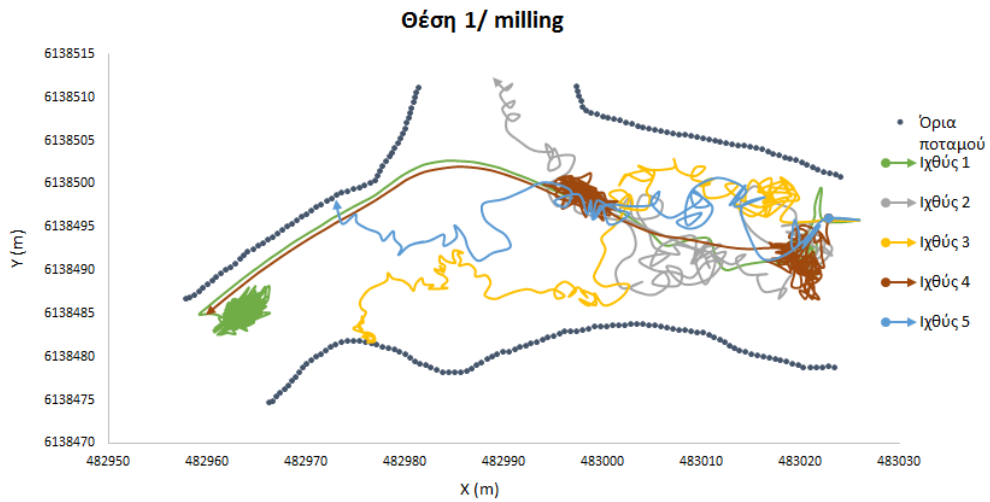
Οι τιμές των παραμέτρων που επιλέγονται επιτυγχάνουν, από τα συνολικά ποσοστά για κάθε συμπεριφορά των 21 θέσεων, μέσο όρο 66% συμπεριφορά non-milling, δηλαδή ευθεία τροχιά χωρίς ξαφνικές αλλαγές στην κατεύθυνση και 34% συμπεριφορά milling, δηλαδή τροχιά με ξαφνικές αλλαγές στην κατεύθυνση και κυκλική συμπεριφορά γύρω από μία περιοχή.

Ακολουθούν διαγράμματα με κάποιες ενδεικτικές τροχιές για κάθε συμπεριφορά που προκύπτουν από ως αποτελέσματα του μοντέλου. Παρουσιάζονται μόνο 4 ή 5 ιχθύες για λόγους ευανάγνωσης.



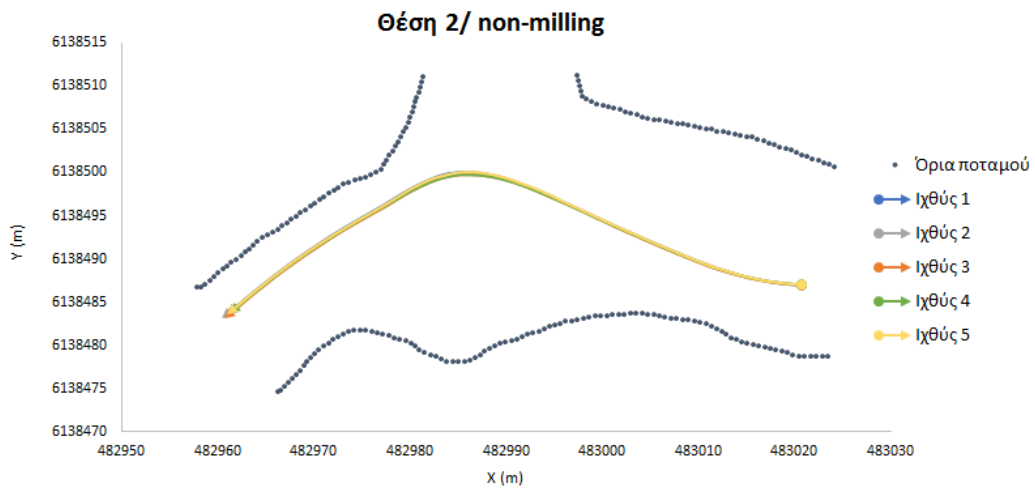
Εικόνα 5.2-33: Για την θέση εκκίνησης 1 οι 5 τροχιές ιχθύων από τις 66.

Για την ευθεία πορεία των ιχθύων χωρίς αλλαγές στην τροχιά τους, δηλαδή non-milling, οι τροχιές προκύπτουν σχεδόν όλες ταυτόσημες.



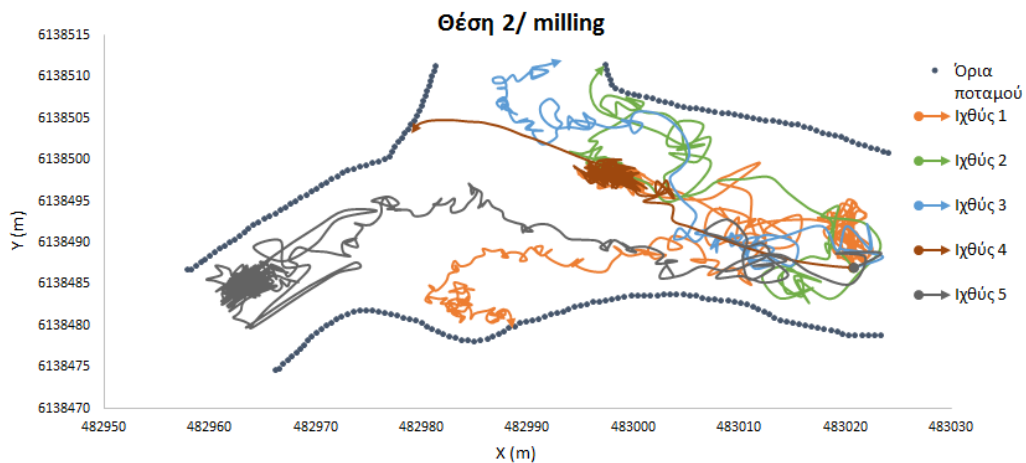
Εικόνα 5.2-34: Για την θέση εκκίνησης 1 οι 5 τροχιές ιχθύων από τις 34.

Όσον αφορά την κυκλική συμπεριφορά, δηλαδή milling, υπάρχει συνδυασμός συμπεριφορών που αντιστοιχούν σε αυτή. Ο ιχθύς 1 ακολουθεί συμπεριφορά B1, B2 και B3, ενώ ο ιχθύς 4 B1 και B2. Οι ιχθύες 2, 3, 5 ακολουθούν B2 και B3.



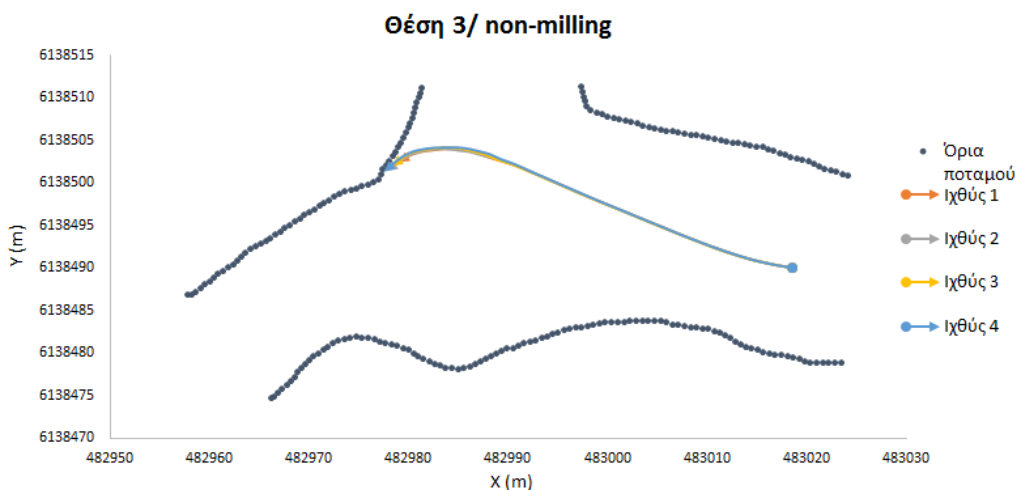
Εικόνα 5.2-35: Για την θέση εκκίνησης 2 οι 5 τροχιές ιχθύων από τις 66.

Για την ευθεία πορεία των ιχθύων, δηλαδή non-milling, οι τροχιές προκύπτουν σχεδόν όλες ταυτόσημες.

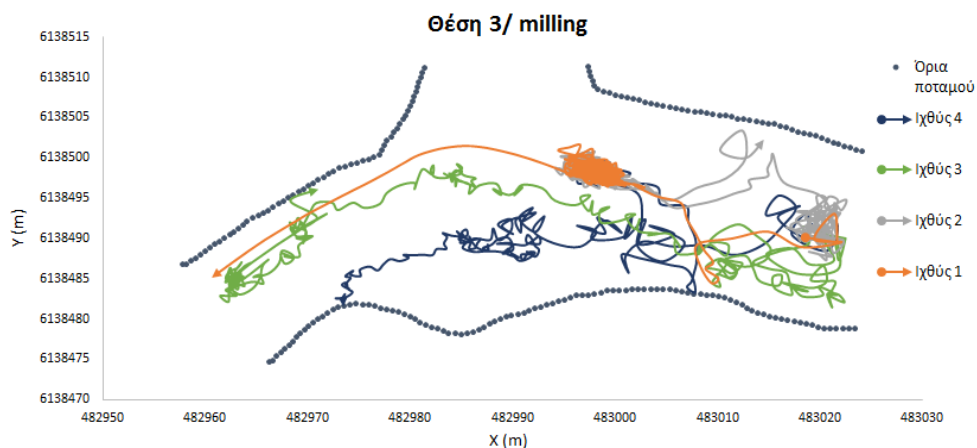


Εικόνα 5.2-36: Για την θέση εκκίνησης 2 οι 5 τροχιές ιχθύων από τις 34.

Όσον αφορά την κυκλική συμπεριφορά, δηλαδή milling, υπάρχει συνδυασμός συμπεριφορών που αντιστοιχούν σε αυτή. Οι ιχθύες 1, 2, 3 ακολουθούν συμπεριφορά Β2 και Β3, ο ιχθύς 4 Β1 και Β2 και ο ιχθύς 5 Β1, Β2 και Β3.

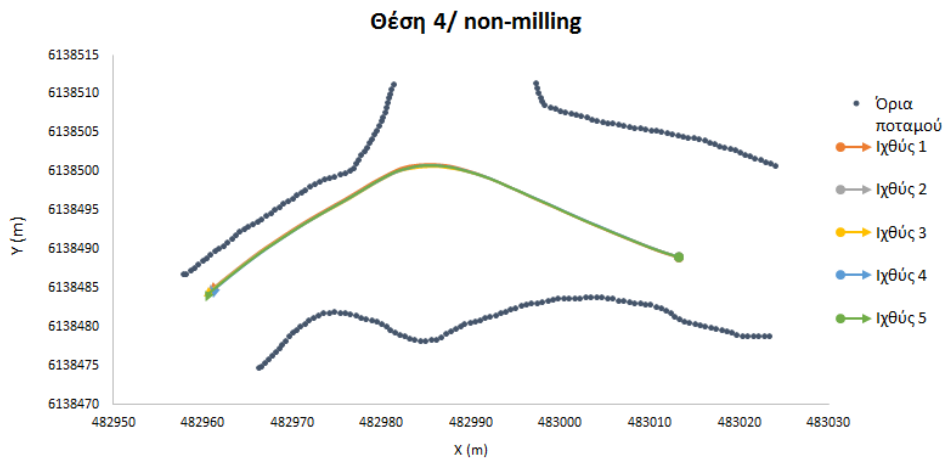


Εικόνα 5.2-37: Για την θέση εκκίνησης 3 οι 4 τροχιές ιχθύων από τις 66.

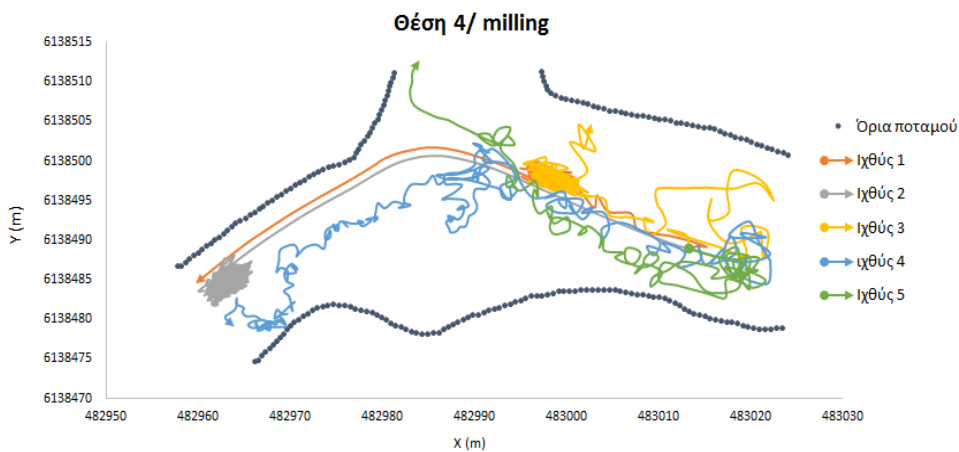


Εικόνα 5.2-38: Για την θέση εκκίνησης 3 οι 4 τροχιές ιχθύων από τις 34.

Στη συμπεριφορά milling παρατηρούμε ότι οι ιχθύες 2, 3 και 4 ακολουθούν συμπεριφορά B2 και B3, ενώ ο 1^{ος} ιχθύς τις συμπεριφορές B1 και B2.

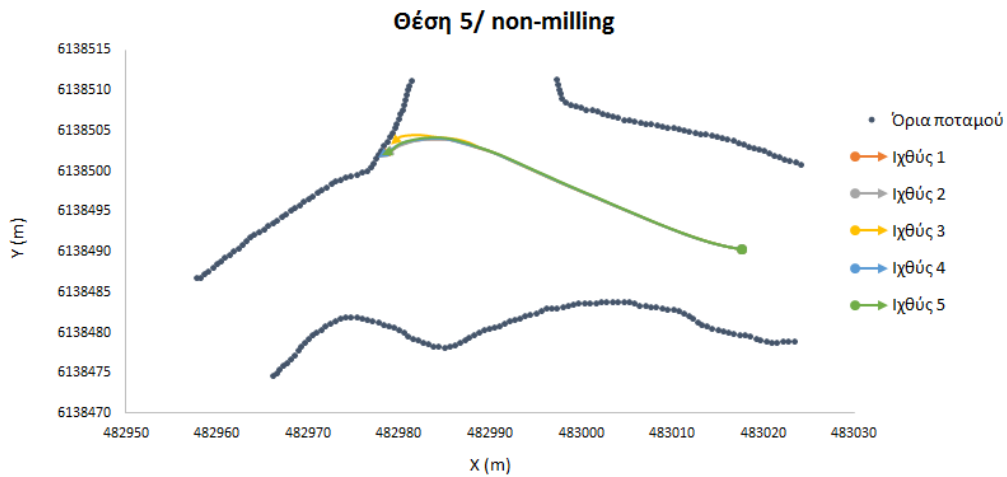


Εικόνα 5.2-39: Για την θέση εκκίνησης 4 οι 5 τροχιές ιχθύων από τις 66.

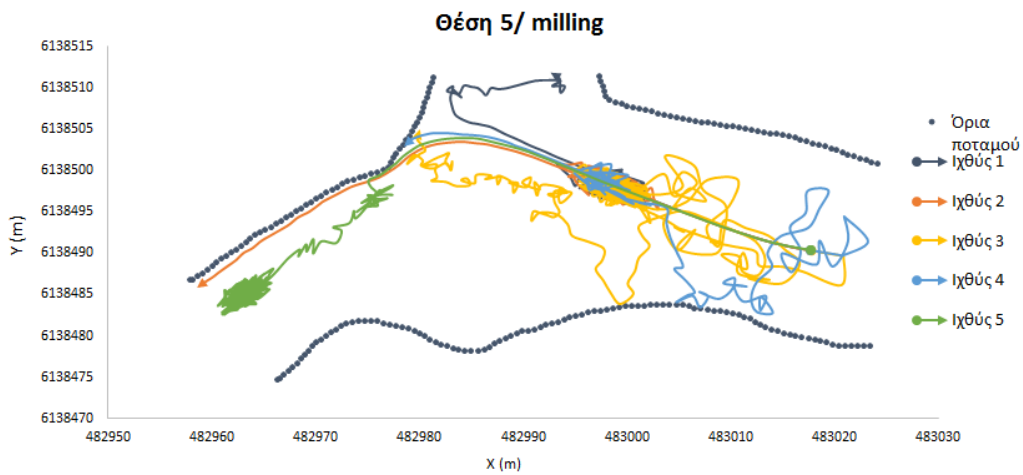


Εικόνα 5.2-40 Για την θέση εκκίνησης 4 οι 5 τροχιές ιχθύων από τις 34.

Στη συμπεριφορά milling παρατηρούμε ότι οι ιχθύες 3, 4 και 5 ακολουθούν συμπεριφορά B2 και B3, ενώ ο 1^{ος} και ο 2^{ος} ιχθύς τις συμπεριφορές B1 και B2.

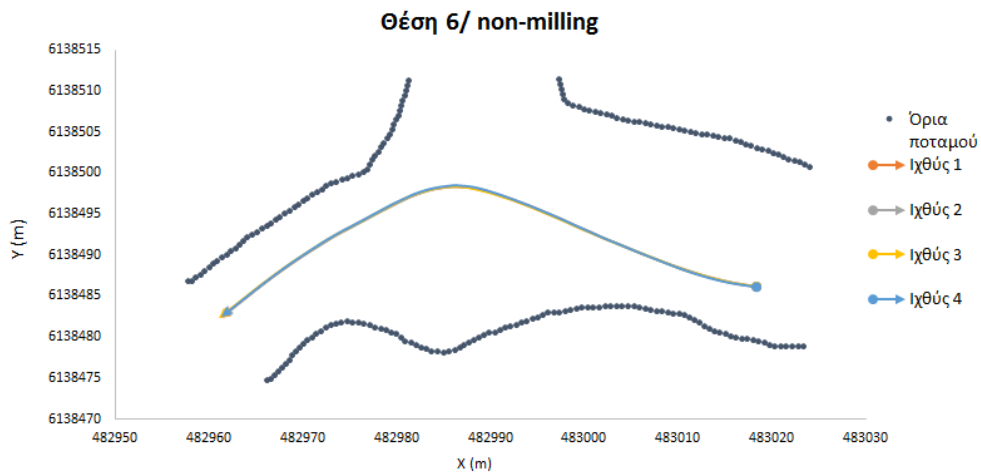


Εικόνα 5.2-41: Για την θέση εκκίνησης 5 οι 5 τροχιές ιχθύων από τις 66.

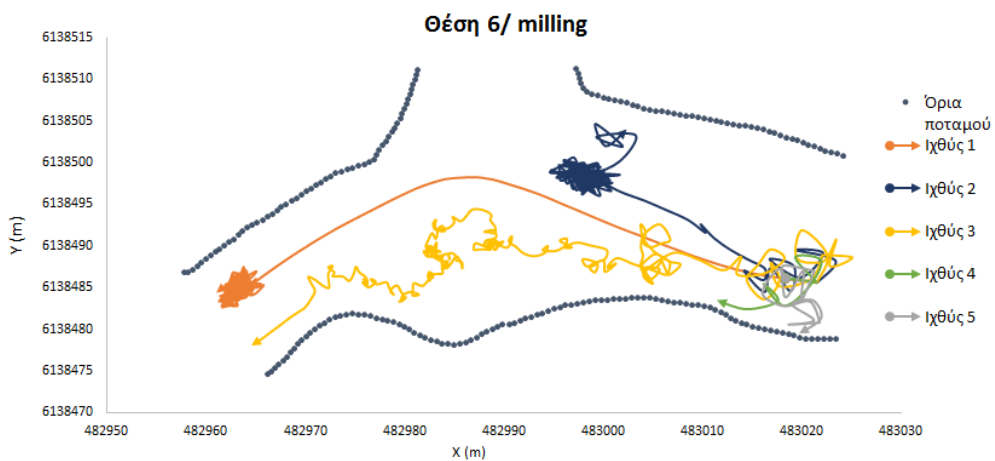


Εικόνα 5.2-42: Για την θέση εκκίνησης 4 οι 5 τροχιές ιχθύων από τις 34.

Από την εικόνα 5.2-41 στη συμπεριφορά milling παρατηρούμε ότι οι ιχθύες 2 και 5 ακολουθούν συμπεριφορά B1 και B2, ενώ οι ιχθύες 1, 3 και 5 τις συμπεριφορές B2 και B3.

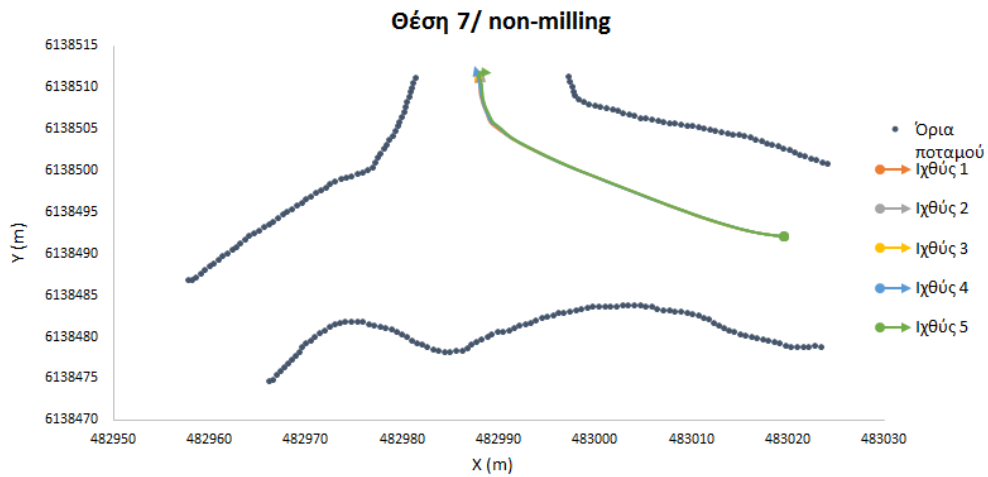


Εικόνα 5.2-43: Για την θέση εκκίνησης 6 οι 4 τροχιές ιχθύων από τις 66.

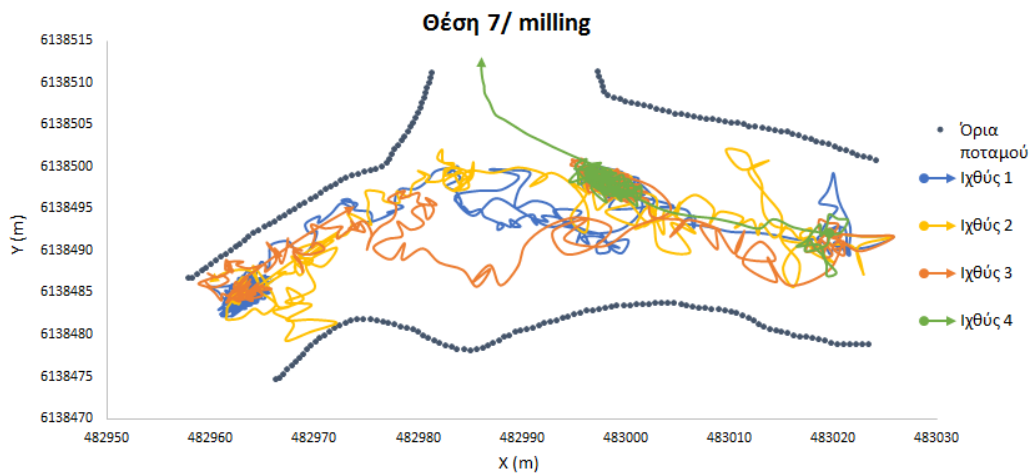


Εικόνα 5.2-44: Για την θέση εκκίνησης 6 οι 5 τροχιές ιχθύων από τις 34.

Από την εικόνα 5.2-43 στη συμπεριφορά milling παρατηρούμε ότι οι ιχθύες 3, 4 και 5 ακολουθούν συμπεριφορά B2 και B3, ενώ ο ιχθύς 1 συμπεριφορά B1 και B2 και ο ιχθύς 2 B1 και B3.



Εικόνα 5.2-45: Για την θέση εκκίνησης 7 οι 5 τροχιές ιχθύων από τις 66.



Εικόνα 5.2-46: Για την θέση εκκίνησης 7 οι 4 τροχιές ιχθύων από τις 34.

Από την εικόνα 5.2-45 στη συμπεριφορά milling παρατηρούμε ότι οι ιχθύες 2, 3 και 5 ακολουθούν συμπεριφορά B2 και B3, ενώ ο ιχθύς 1 συμπεριφορά B1 και B2.

Από τα συνολικά αποτελέσματα που περιλαμβάνουν την ανάλυση ευαισθησίας και την εφαρμογή του μοντέλου ιχθύος γίνεται αντιληπτό ότι όσο η θέση εκκίνησης του ιχθύος βρίσκεται πιο κοντά στην πάνω όχθη τόσο ο ιχθύς έχει μεγαλύτερη τάση να καταλήξει στη ζώνη απομείωσης του νερού δηλαδή στην είσοδο του fish farm. Στις πειραματικές τροχιές μόνο 4 ιχθύες από τους 61 κατέληξαν στο fish farm ανεξαρτήτως θέσης εκκίνησης, οπότε το σημείο αυτό στο μοντέλο θα πρέπει μελλοντικά να επανεξεταστεί. Πιθανόν να υπάρχουν διαφορές στο πεδίο ροής από την ημέρα μέτρησης των ταχυτήτων από τους ερευνητές και τις ημέρες μετανάστευσης των μελετώμενων ιχθύων, καθώς οι καταγραφές των τροχιών των ιχθύων δεν έλαβαν χώρα την ίδια μέρα με τις μετρήσεις της μέσης ταχύτητας του πεδίου ροής, αλλά καθ' όλη την χρονική διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος.

Γενικά, δεν είναι επιθυμητό οι ιχθύες να εισέρχονται στο fish farm, καθώς αποτελεί δυσμενές περιβάλλον για τον Ατλαντικό Σολομό διότι εκτρέφονται Ιριδίζουσες Πέστροφες (Rainbow Trout) και αυξάνεται ο κίνδυνος θνησιμότητας. Επίσης, η είσοδος τους στο fish farm δεν είναι επιθυμητή επειδή διακόπτει την κατάντη μετανάστευσή τους. Όπως αναφέρεται και στην έρευνα των Svendsen et al. 2011, οι ιχθύες που παρουσιάζουν συμπεριφορά με απότομες αλλαγές μέσα στην περιοχή μελέτης (milling behavior) περνούν περισσότερο χρόνο εξερευνώντας την, οπότε έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να εισέλθουν στο fish farm. Όμως, αν παραμείνουν περισσότερο χρόνο στην περιοχή και καθυστερήσουν την κατάντη μετανάστευσή τους, είναι πολύ πιθανό να περάσουν από το στάδιο του νεαρού Σολομού (smolt) στο στάδιο του μικρού και πάλι (parr). Η διαδικασία αυτή ονομάζεται desmoltification. Οι μελετώμενοι ιχθύες οι οποίοι δεν συνέχισαν την κατάντη μετανάστευσή τους, καθώς δεν πιάστηκαν στην παγίδα τύπου Wolf κατάντη της περιοχής μελέτης, πιθανόν να επιστρέψουν στο προηγούμενο στάδιο ηλικίας και να μεταναστεύσουν την επόμενη άνοιξη. Η μεταναστευτική καθυστέρηση ίσως έχει επιζήμιες συνέπειες για τον πληθυσμό του Σολομού, καθώς λιγότεροι ενήλικοι Σολομοί θα επιστρέφουν για αναπαραγωγή. Η καθυστέρηση αυτή μπορεί να αποφευχθεί με διάφορους τρόπους καθοδήγησης των ιχθύων και ερεθίσματα (π.χ. χρήση φωτισμού στη μεταναστευτική δίοδο).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1. Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία έχουν ως εξής:

- Η προσομοίωση της συμπεριφοράς των ιχθύων είναι εφικτή με την χρήση του μοντέλου ιχθύων, έχοντας ως ερέθισμα ενεργοποίησης συμπεριφορών υδροδυναμικά χαρακτηριστικά.
- Τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης που επιδρούν ως ερεθίσματα στη συμπεριφορά ιχθύων, τα οποία στην προκειμένη περίπτωση είναι οι ταχύτητες του πεδίου ροής και οι επιταχύνσεις, υπολογίζονται με την χρήση του μοντέλου Telemac-2d και προκύπτουν πολύ ικανοποιητικά συγκρίνοντάς τα με τις πειραματικές μετρήσεις της ταχύτητας, αν λάβει κανείς υπόψη ότι το πεδίο ροής καταγράφηκε μόνο μια φορά και όχι καθ' όλη τη διάρκεια της κατάντη μετανάστευσης των ιχθύων και της διεξαγωγής των πειραματικών μετρήσεων, ενώ παράλληλα οι πληροφορίες που είχαν δοθεί σχετικά με το υπόστρωμα του πυθμένα δεν ήταν πολύ λεπτομερείς.
- Με τη βοήθεια των πειραματικών τροχιών των μελετώμενων ιχθύων έγινε εφικτή η κατασκευή καμπύλων καταλληλότητας βάθους και ταχύτητας νερού της περιοχής μελέτης που αφορούν το στάδιο ηλικίας smolt του Ατλαντικού Σολομού, καθώς βιβλιογραφικά δεν υπάρχουν σχετικές μελέτες. Η προτίμηση σε βαθύτερα και ταχύτερα νερά επιβεβαιώνεται και από μελέτη σε διαφορετική περιοχή.
- Ο ιχθύς μπορεί να αντιληφθεί το ερέθισμα του μεγέθους της επιτάχυνσης και να επιλέξει ανάμεσα σε τρεις συμπεριφορές:
 - B1, όπου ο ιχθύς προσανατολίζεται με την κατεύθυνση της ροής.
 - B2, που περιλαμβάνει κολύμβηση προς περιοχές με υψηλότερες ταχύτητες ροής, ώστε ο ιχθύς να διευκολύνει την κατάντη μετανάστευσή του αποφεύγοντας εμπόδια και να περιορίσει την έκθεση του στην τύρβη.
 - B3, που είναι μια αντίδραση διαφυγής και περιλαμβάνει κολύμβηση αντίθετα στην κατεύθυνση της ροής.

Οι συμπεριφορές B2 και B3 σχετίζονται με αλλαγές στην επιτάχυνση, είτε αύξηση είτε μείωση. Η ενεργοποίησή τους μπορεί να επιτευχθεί με βαθμονόμηση του μοντέλου. Από την ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύος προκύπτει ότι οι σημαντικότερες παράμετροι είναι το κατώφλι της B2 συμπεριφοράς και οι συντελεστές μνήμης των τριών συμπεριφορών, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την βαθμονόμηση.

Μέσω της κατάλληλης προσαρμογής των παραμέτρων επιτυγχάνεται η προσομοίωση συνολικά 100 ιχθύων από τους οποίους οι 66 ακολουθούν ευθεία πορεία, δηλαδή συμπεριφορά B1 και οι υπόλοιποι 34 παρουσιάζουν συμπεριφορά με ξαφνικές αλλαγές κατεύθυνσης, δηλαδή συνδυασμό B2 και B3. Τα ποσοστά αυτά δίνονται από τις πειραματικές τροχιές των μελετώμενων ιχθύων.

- Το μοντέλο συμπεριφοράς ιχθύων παρά το γεγονός ότι καταφέρνει να προσομοιώσει βασικές συμπεριφορές ιχθύων λόγω υδροδυναμικών

ερεθισμάτων, δεν καταφέρνει να προσομοιώσει επακριβώς τις πειραματικές τροχιές που δίνονται.

- Τέλος, εξίσου σημαντικός επίσης πρέπει να θεωρηθεί και ο παράγοντας τυχαιότητας που περιλαμβάνεται στο μοντέλο, καθώς εμφανίζεται σε 8 εξισώσεις υπολογισμών.

6.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Όσον αφορά τη μελλοντική έρευνα επί του θέματος προτείνονται τα εξής:

- Διεξοδικότερη έρευνα της δομής και της λειτουργίας του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων ώστε να προσομοιωθεί ακριβέστερα η κίνηση των ιχθύων κατά την κατάντη μετανάστευσή τους. Προτείνεται η κίνηση των ιχθύων να εξεταστεί και στις 3 διαστάσεις και να συμπεριληφθεί και άλλη μία συμπεριφορά που σχετίζεται με την πίεση λόγω βάθους νερού.
- Δοκιμές άλλων οριακών τιμών που αφορούν την κάθε συμπεριφορά (κατώφλια-thresholds), καθώς οι τιμές αυτές ορίζονται ως 'site-specific', δηλαδή προκύπτουν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης. Χρησιμοποιούνται οι συγκεκριμένες τιμές λόγω του ότι τις προτείνει ο ίδιος ο ερευνητής διότι υπάρχουν περισσότερα δεδομένα παρατηρήσεων σχετικά με αυτές (Goodwin et al., 2014).
- Την εφαρμογή του μοντέλου σε άλλες περιοχές μελέτης με διαθέσιμα πειραματικά στοιχεία, ώστε να βρεθούν οι παράγοντες εκείνοι που θα το διαμορφώσουν με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να εφαρμόζεται σε διαφορετικές περιοχές μελέτης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Γιαννούλης Σ., 2016. Mathematical modeling of fish-behavior in water bodies, Μεταπτυχιακή διατριβή, ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ.
2. Ευρωπαϊκό Συμβούλιο, 2000. Οδηγία 2000/60/EC του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23 Οκτωβρίου 2000 για την θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων. Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων EL L 327, 1-73. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας.
3. Μεγαλοφώνου Περσεφόνη, Επικ. Καθ., ΕΚΠΑ. 'Ιχθυολογία. Ενότητα 3. Συμπεριφορά Ιχθύων – Τακτισμοί'. Έκδοση 1.0. Αθήνα, 2015.
4. Μεγαλοφώνου Περσεφόνη, Επικ. Καθ., ΕΚΠΑ. 'Ιχθυολογία. Ενότητα 3. Μεταναστεύσεις'. Έκδοση 1.0. Αθήνα 2015
5. Παγωνόπουλος Σ., 2017: Mathematical model on simulating fish-behavior in river flows, Μεταπτυχιακή διατριβή, ΔΠΜΣ Υπολογιστική Μηχανική, ΕΜΠ.
6. Τσούλος Λ., Σκοπελίτη Α., Στάμου Λ., 2015. *Χαρτογραφική σύνθεση και απόδοση σε ψηφιακό περιβάλλον*. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο <http://hdl.handle.net/11419/2506>.
7. Abdelaziz S. M. A., 2013. Numerical simulation of fish behavior and fish movement through passages. TUM, Lehrstuhl fur Wasserbau und Wasserwirtschaft.
8. Arenas A., Politano M., Weber L. and Timko M., 2015. Analysis of movements and behavior of smolts swimming in hydropower reservoirs. *Ecological Modelling*, 312, 292-307.
9. Bleckmann H., 2007. The lateral line system of fish. *Sensory system neuroscience, Fish Physiology* 25, 411-453.
10. Bovee K. D., 1986. Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in the instream flow incremental methodology. Instream flow information paper #21 FWS/OBS-86/7. USDI Fish and Wildlife Service, Washington DC.
11. Brian, L., 2003. The representation of the environment in the context of individual-based modeling. *Ecological Modelling*. 159, 279–296.
12. Coombs, S., 1999. Signal detection theory, lateral line excitation patterns and prey capture behavior of mottled sculpin. *Animal Behaviour* 58, 421-430.
13. Coombs, S., Van Netten, S., 2006. The hydrodynamics and structural mechanics of the lateral line system. *Fish Biomechanics, Fish Physiology* 23, 103-139.
14. De Doncker L., Troch P., Verhoeven R., 2007. Accuracy of discharge measurements in a vegetated river. *Flow Measurement and Instrumentation* 19, 29-40.
15. Enders E., Roy M., Ovidio M., Hallot E., 2009. Habitat Choice by Atlantic Salmon Parr in Relation to Turbulence at a Reach Scale. *North American Journal of Fisheries Management* 30, 1819-1830.
16. Gao Z., Andersson H., Dai H., Jiang F., Zhao L., 2016. A new Eulerian-Lagrangian agent method to model fish in a vertical slot fishway. *Ecological Engineering* 88, 217-225.
17. Garcia de Jalon D., Gortazar J.. Evaluation of Instream Habitat Enhancement Options Using Fish Habitat Simulations: Case-Studies in the River Pas (Spain). *Aquatic Ecology*, 2007.

18. Goodwin R. A., Nestler J. M., Anderson J. J., Weber L. J., Loucks D. P., 2006. Forecasting 3-D fish movement behavior using a Eulerian-Lagrangian-agent method (ELAM). *Ecological Modelling* 192, 197-223.
19. Goodwin R. A., Politano M., Garvin J. W., Nestler J. M., Hay D., Anderson J. J., Weber L. J., Dimperio E., Smith D. L., Timko M., 2014. Fish navigation of large dams emerges from their modulation of flow field experience. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111, 5277-5282.
20. Haefner J., Bowen M., 2002. Physical based model of fish movement in fish extraction facilities. *Ecological Modelling* 152, 227-245.
21. Hendry K & Cragg-Hine D (2003). *Ecology of the Atlantic Salmon. Conserving Natura 2000 Rivers Ecology Series No. 7.* English Nature, Peterborough.
22. Kanno Y. & Vokoun J. C., 2010. Evaluating effects of water withdrawals and impoundments on fish assemblages in southern New England streams, USA. *Fisheries Management and Ecology*, 17, 272-283.
23. Katopodis C., 2005. Developing a toolkit for fish passage, ecological flow management and fish habitat works. *Journal of Hydraulic Research* 43, 451-467.
24. Lemasson B., Haefner J. and Bowen M., 2008. The effect of avoidance behavior on predicting fish passage rates through water diversion structures. *Ecological Modelling*, 219, 178-188.
25. Olsson I. C., Greenberg L. A & Eklov A. G., 2001. Effect of an Artificial Pond on Migrating Brown Trout Smolts. *North American Journal of Fisheries Management*, 21:3, 498-506.
26. Regulatory frameworks for water resources management; A Comparative Study, Salman S. M. A., Bradlow D. D., 2006. The World Bank, Washington DC.
27. Rodriguez A., Bermudez M., Rabunal J., Puertas J., Dorado J., Pena L., Balairon L., 2011. Optical fish trajectory measurement in fishways through computer vision and artificial neural networks. *Journal of Computing in Civil Engineering* 25, 291-301.
28. Svendsen J. C., Eskesen A. O., Aarestrup K., Koed A., Jordan A. D., 2007. Evidence for non-random spatial positioning of migrating smolts (Salmonidae) in a small lowland stream. *Freshwater Biology* 52, 1147-1158.
29. Svendsen J. C., Aarestrup K., Deacon M. G. & Christensen R. H. B., 2010. Effects of a surface oriented travelling screen and water abstraction practices on downstream migrating Salmonidae smolts in a lowland stream. *River Research and Applications* 26, 353-361.
30. Svendsen J. C., Aarestrup K., Mlate H., Thygesen U. H., Baktoft H., Koed A., Deacon M. G., Cubitt F.K. & McKinley S., 2011. Linking individual behavior and migration success in *Salmo salar* approaching a water withdrawal site: implications for management. *Aquatic Living Resources* 24, 201-109.
31. Telemac Modelling System, Telemac-2D Software, Release 7.0. User manual, 2014.
32. Thorstad E. B., Whoriskey F., Uglem I., Moore A., Rikardsen A. H. and Finstad B., 2012. A critical life stage of the Atlantic salmon *Salmo salar*: behaviour and survival during the smolt and initial post-smolt migration. *Journal of Fish Biology* 81, 500-542.
33. Tyus Harold M., 2011. *Ecology and Conservation of Fishes*, CRC Press, London, New York.

34. Vowles A. S., Anderson J., Gessel M. H., Williams J. G., Kemp P. S., 2014. Effects of avoidance behavior on downstream fish passage through areas of accelerating flow when light and dark. *Animal Behaviour* 92, 101-109.
35. Webb P. W., 1975. Hydrodynamics and energetics of fish propulsion, p. 49. *Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada*.